

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**DIMENSIONAMENT I SIMULACIÓ D'UNA MICROXARXA
ELÈCTRICA HÍBRIDA AUTÒNOMA AC**



Memòria i Annexos

Autor: Aleix Garcia Hidalgo
Director: Francisco Jose Casellas Beneyto
Convocatòria: Juny 2018

Resum

El model energètic emprat a escala mundial fins a l'actualitat es basa en els combustibles fòssils, comportant greus problemes mediambientals que han obligat a la humanitat a la cerca d'alternatives per a la generació d'energia elèctrica. La transició cap a un model energètic totalment renovable i sostenible passa per la popularització de sistemes energètics tal com les microxarxes. Una microxarxa té com a font principal d'energia un o més recursos energètics renovables. A més a més, solen incorporar una font d'energia convencional, com un generador dièsel, com a suport, la qual cosa dóna lloc a una microxarxa híbrida. Els sistemes energètics híbrids són clau per dur a terme la transició comentada mentre no es millorin els sistemes d'emmagatzematge que permetin la utilització completa dels recursos renovables. Aquest projecte consisteix a estudiar una microxarxa elèctrica híbrida en corrent altern, la qual està aïllada de la xarxa elèctrica. L'objectiu principal del treball és minimitzar l'ús del generador dièsel de suport amb finalitats econòmiques i mediambientals, combinant els diferents recursos energètics i un sistema d'emmagatzematge per a satisfer les necessitats de consum. A banda de l'estudi teòric, es realitzarà una comprovació pràctica amb l'equipament del laboratori E3PACS de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est.

Resumen

El modelo energético empleado a escala mundial hasta la actualidad se basa en los combustibles fósiles, comportando graves problemas medioambientales que han obligado a la humanidad a la búsqueda de alternativas para la generación de energía eléctrica. La transición hacia un modelo energético totalmente renovable y sostenible pasa por la popularización de sistemas energéticos tal como las microrredes. Una microrred tiene como fuente principal de energía uno o más recursos energéticos renovables. Además, suelen incorporar una fuente de energía convencional, como un generador diésel, como soporte, lo que da lugar a una microrred híbrida. Los sistemas energéticos híbridos son clave para llevar a cabo la transición comentada mientras no se mejoren los sistemas de almacenamiento que permitan la utilización completa de los recursos renovables. Este proyecto consiste en estudiar una microrred eléctrica híbrida en corriente alterna, la cual está aislada de la red eléctrica. El objetivo principal del trabajo es minimizar el uso del generador diésel de apoyo con fines económicos y medioambientales, combinando los diferentes recursos energéticos y un sistema de almacenamiento para satisfacer las necesidades de consumo. Aparte del estudio teórico, se realizará una comprobación práctica con el equipamiento del laboratorio E3PACS de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este.

Abstract

The energy model used on a global scale to the present day is based on fossil fuels, resulting in serious environmental problems that have forced humanity to find alternatives for the generation of electrical energy. The transition to a totally renewable and sustainable energy model goes through the popularization of energy systems such as microgrids. A microgrid has one or more renewable energy resources as the main source of energy. In addition, they usually incorporate a conventional power source, such as a diesel generator, as a support, which gives rise to a hybrid microgrid. Hybrid energy systems are key to conducting the commented transition while storage systems are not improved that allow the full use of renewable resources. This project consists in studying a hybrid electric microgrid in alternating current, which is isolated from the electrical network. The main objective of the project is to minimize the use of the diesel generator of support for economic and environmental purposes, combining different energy resources and a storage system to meet the needs of consumption. Apart from the theoretical study, a practical check with the equipment of the E3PACS laboratory of the Barcelona East School of Engineering will be done.



Agraïments

Al professor Francisco Casellas, per ajudar-me a concretar el tema del meu treball després d'algunes dificultats inicials i per guiar-me durant el transcorregut d'aquest.

Al grup de recerca E3PACS, per deixar-me utilitzar el seu laboratori per dur a terme la part pràctica del meu projecte.

Al meu company d'estudis i amic Sergi Obrador, per ajudar-nos amb una porció de codi que permet controlar una de les màquines del laboratori E3PACS, ja que els dos hem emprat aquest laboratori i utilitzat pràcticament els mateixos equipaments.

A la meva família, per permetre'm gaudir d'uns estudis universitaris de qualitat.



Glossari

DG - *Distributed Generation* o Generació Distribuïda

PFC - *Power Flow Control* o Control de Fluxos de Potència

ESS - *Energy Storage Systems* o Sistemes d'Emmagatzematge d'Energia

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition* o Control supervisor i adquisició de dades

CIM - *Computer-Integrated Manufacturing* o Manufactura integrada per computador

EMS - *Energy Management System* o Sistema de Gestió d'Energia

AC - *Alternating Current* o Corrent Altern

DC - *Direct Current* o Corrent Continu

ATS - *Automatic Transfer Switch* o Interruptor de transferència automàtica

FV - Fotovoltaic

CHP - *Combined Heat and Power* o Cogeneració

Backup - Suport, reserva.

Genset - Grup electrogen

ISO - *International Organization for Standardization* o Organització Internacional per a l'Estandardització

LV - *Low Voltage* o Baixa Tensió

MV - *Medium Voltage* o Mitja Tensió

HES - *Hybrid Energy System* o Sistema Energètic Híbrid

RES - *Renewable Energy Sources* o Fonts Energètiques Renovables

HRES - *Hybrid Renewable Energy System* o Sistema Energètic Renovable Híbrid



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
1. INTRODUCCIÓ	11
1.1. Origen i motivació del treball	11
1.2. Objectius i abast del treball	12
2. ESTAT DE L'ART	15
2.1. Microxarxes.....	15
2.1.1. Concepte.....	15
2.1.2. Elements	16
2.1.3. Tipus.....	21
2.1.4. Beneficis.....	22
2.2. Sistemes híbrids	22
3. DESCRIPCIÓ DE L'ESCENARI ESTUDIAT	25
3.1. Localització	25
3.2. Fonts de producció energètica i emmagatzematge.....	26
3.3. Consums energètics	28
3.4. Esquema de blocs	29
4. DIMENSIONAMENT	33
4.1. Monitorització de consums	33
4.2. Tractament de les dades de consum.....	37
4.3. Introducció de paràmetres al programa HOMER.....	40
4.4. Resultats de la simulació amb HOMER.....	46
4.4.1. Anàlisi energètic	46
4.4.2. Anàlisi econòmic.....	52
5. ASSAIG DE L'ESCENARI	57
5.1. Equipament emprat.....	57

5.2. Simulacions prèvies	74
5.3. Programació.....	82
5.4. Resultats de l'assaig	85
6. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	93
CONCLUSIONS	95
Conclusions generals	95
Conclusions personals	96
Treball futur	97
PRESSUPOST	99
Desglossament de costos	99
Cost total.....	100
BIBLIOGRAFIA	103
ANNEX A	107
Codi dels scripts de MATLAB	107
Taula Excel	110
Codi LabVIEW.....	112

1. Introducció

1.1. Origen i motivació del treball

Existeixen una sèrie de reptes a nivell energètic que la societat actual ha d'afrontar, com l'augment de la demanda energètica, degut en gran part a l'augment exponencial de la població, la volatilitat dels preus i les pertorbacions del subministrament. Així mateix, totes les activitats del sector energètic han de minimitzar el seu impacte ambiental. La Unió Europea es troba al capdavant de la persecució d'objectius com la seguretat de l'abastament d'energia, la competitivitat i la sostenibilitat. S'han establert un conjunt de fites de clima i energia en el marc europeu pels anys 2020, 2030 i 2050. («Energía - EUROPA | Unión Europea») Aquests objectius consisteixen a reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, augmentar el pes de les energies renovables en el mix energètic i millorar l'eficiència energètica. Un dels mètodes més eficients per contribuir a la consecució d'aquests és la implantació de sistemes de gestió de l'energia com les microxarxes elèctriques.

Actualment existeix una clara tendència cap a un sistema energètic descentralitzat i conceptes com l'autoconsum o l'autoabastament estan guanyant pes en el sector energètic. L'evolució cap a les xarxes elèctriques intel·ligents té diversos causants: l'augment de la demanda energètica i de l'electrodependència, l'alliberament del sector elèctric i la reducció de costos, el desenvolupament tecnològic, l'envelliment del sistema elèctric actual, la millora de la garantia i fiabilitat del subministrament, la integració de fonts d'energia de caràcter estocàstic i generació distribuïda i la integració en el sistema elèctric de nous agents (vehicles elèctrics, edificis o polígons intel·ligents, microxarxes). Un concepte popular en l'actualitat és el d'*Smart Grid*, que es podria definir com una xarxa capaç d'integrar de manera eficient el comportament i les accions de tots els usuaris connectats (empreses de generació d'electricitat, consumidors i agents que exerceixin ambdós papers) amb la finalitat de proporcionar sistemes elèctrics econòmicament eficients i sostenibles, amb poques pèrdues i un alt nivell de qualitat, garantia d'abastament i seguretat. Les microxarxes es poden definir com xarxes elèctriques de dimensions reduïdes capaces d'autogestionar-se de manera independent de la xarxa principal. Una microxarxa es podria considerar, doncs, en una xarxa elèctrica intel·ligent a petita escala. (Villafáfila Robles 2017)

Aquest treball em permet col·laborar en l'estudi de l'àmbit de les microxarxes elèctriques per tal de satisfer el meu objectiu personal de contribuir a reduir l'impacte ambiental derivat del consum energètic humà, tot fent servir recursos energètics més sostenibles. Així mateix, la microxarxa dissenyada serà autònoma, fet que elimina la dependència de grans empreses energètiques i els sobrecàrrecs econòmics que pot comportar un contracte amb aquestes empreses. Finalment, també

és de destacar que el motiu principal de la realització d'aquest treball és la seva obligatorietat per a l'obtenció del títol de Grau en Enginyeria de l'Energia a la Universitat Politècnica de Catalunya.

1.2. Objectius i abast del treball

El principal objectiu d'aquest projecte és demostrar la viabilitat tècnica i econòmica d'una microxarxa elèctrica aplicada a un àmbit domèstic, així com analitzar el seu impacte mediambiental. Degut a les dificultats existents actualment a Espanya pel que respecte a normativa i legalitat en l'àmbit de l'autoconsum i, en definitiva, de les microxarxes elèctriques, s'ha decidit analitzar el cas d'una microxarxa aïllada de la xarxa principal de subministrament elèctric. El projecte també disposa d'un objectiu secundari, la verificació pràctica de l'escenari estudiat amb els equipaments d'un laboratori, com per exemple un grup electrogen.

D'altra banda, una microxarxa amb únicament fonts d'energia renovables presenta certes mancances i problemàtiques en l'actualitat. La majoria dels recursos energètics d'origen renovable es caracteritzen per la seva intermitència, de manera que no poden adaptar-se en tot moment als consums que es volen suplir. Això comporta la utilització de sistemes d'emmagatzematge, els quals no es troben actualment en una fase de desenvolupament prou avançat com per corregir completament aquest desajust entre producció i demanda i fer rendible la instal·lació al mateix temps. Per aquest motiu, la gran majoria de microxarxes elèctriques existents incorporen un sistema de suport. En cas d'instal·lacions connectades a la xarxa principal de subministrament, aquesta permet satisfer els consums quan els recursos renovables no siguin suficient. En cas d'instal·lacions aïllades, el sistema de suport per excel·lència és un grup electrogen, alimentat generalment amb combustibles com el dièsel o la gasolina.

L'ús de sistemes basats en combustibles fòssils no compleix en la seva totalitat els objectius energètics plantejats a nivell mundial que s'han comentat amb anterioritat. No obstant això, els sistemes híbrids, denominació que reben les instal·lacions renovables amb un sistema de suport no renovable, constitueixen la transició cap a sistemes totalment renovables, mentre continuen en desenvolupament i estudi uns sistemes d'emmagatzematge més eficients.

En aquest projecte es dimensionarà una microxarxa elèctrica aïllada amb un grup electrogen com a sistema de suport. L'objectiu serà reduir al màxim el nombre d'hores d'utilització del grup electrogen i el consegüent consum de combustible, prioritant l'energia provinent de fonts renovables i de l'emmagatzematge. Aquest fet permet reduir l'impacte ambiental de la instal·lació, fet que constitueix un altre dels objectius principals del projecte. Per descomptat, es realitzarà un breu estudi econòmic.

A més a més, com ja s'ha comentat, es realitzarà una simulació en el laboratori E3PACS de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, el qual disposa dels equipaments que configura la microxarxa descrita. Es partirà d'un escenari en concret i es verificaran els processos d'agregació o desagregació d'elements de la microxarxa.

2. Estat de l'art

2.1. Microxarxes

2.1.1. Concepte

El terme original de microxarxa va ser encunyat per Robert H. Lasseter l'any 1998, qui definia una microxarxa com un sistema elèctric-energètic que consta de generació distribuïda (DG), control de fluxos de potència (PFC) i sistemes d'emmagatzematge (ESS).

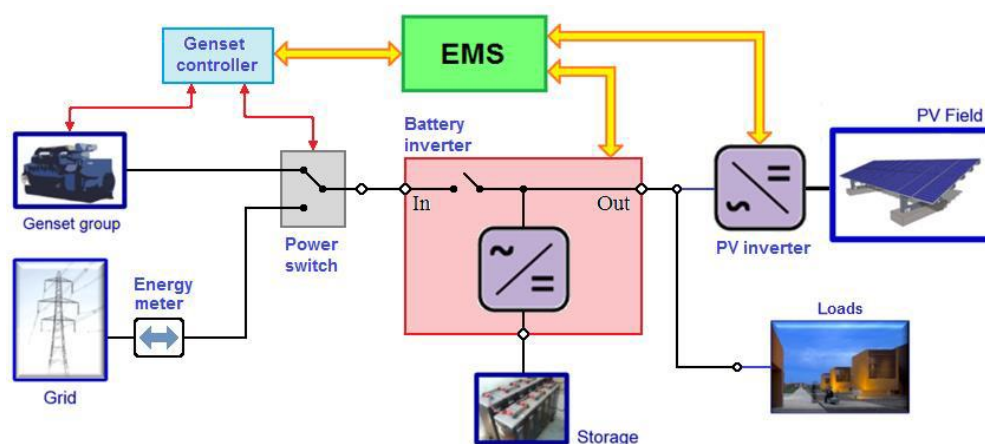


Figura 2.1. Diagrama de blocs bàsic general d'una microxarxa. (Piqué 2017)

Una altra possible definició per una microxarxa és la d'una porció de la xarxa de distribució que pot operar de forma agregada o desagregada de la xarxa elèctrica (Casellas 2018). Permet coordinar de manera intel·ligent els diferents agents que la componen proporcionant un subministrament sostenible, segur i eficient. Compta amb diversos dispositius que poden consumir, emmagatzemar o generar energia. (Villafáfila 2017) Les micro-xarxes integren sensors intel·ligents que aporten informació, dades i mesures en temps real als centres de nivell local, que actuen de nucli capaç de controlar la microxarxa i com a punt de connexió amb la resta de microxarxes. (López-Vázquez 2016)

A la Figura 2.1 es presenta l'esquema general d'una microxarxa elèctrica amb els diferents elements que la configuren, així com la funció del sistema de gestió d'energia comentat. El sistema de gestió d'energia o *Energy Management System* (EMS) es pot definir com un conjunt d'elements interrelacionats o interactius per establir una política energètica i uns objectius energètics, i processos i procediments per assolir aquests objectius. («ISO 50001:2011(en), Energy management systems — Requirements with guidance for use») Un enfocament general del disseny de l'EMS es

basa en diferents nivells de presa de decisions amb una estructura jeràrquica clarament definida. Una estructura que s'empra amb freqüència es basa en tres nivells en la presa de decisions: operacional, tàctic i estratègic. (Velasco et al. 2015)

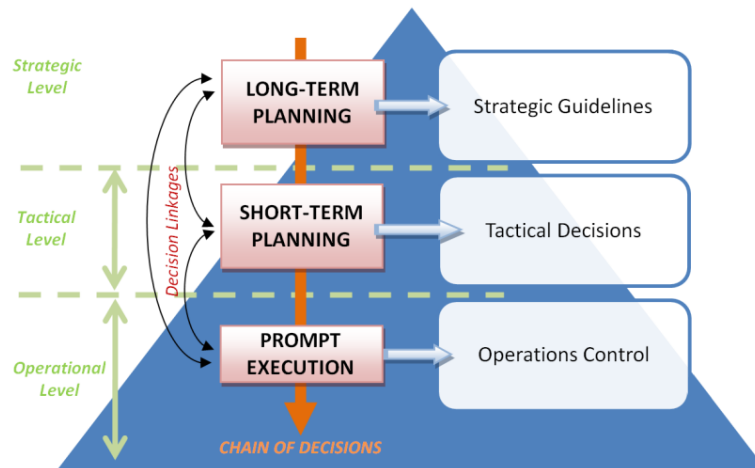


Figura 2.2. Estructura jeràrquica de tres nivells d'un EMS. (Piqué 2017)

- Nivell operacional. Aquest nivell s'encarrega directament de l'equipament com l'inversor fotovoltaic, l'inversor de les bateries, els generadors dièsel i l'interruptor AC (*Automatic Transfer Switch*, ATS) per connectar o desconnectar el grup electrogen en funció de la disponibilitat de la xarxa.
- Nivell tàctic. Aquest nivell correspon a allò que s'ha de programar primer en l'EMS, i s'encarrega de gestionar els fluxos de potència.
- Nivell estratègic. Aquest nivell correspon a la màxima jerarquia i implementa les estratègies per gestionar l'energia del sistema.

2.1.2. Elements

En aquest apartat es presentaran els diferents elements que configuren una microxarxa elèctrica de forma generalitzada, i s'explicaran amb més detall aquells que configuren la microxarxa estudiada en aquest treball.

- ✚ **XARXA ELÈCTRICA.** Ja que la instal·lació a estudiar és autònoma, no s'entrarà en detalls en relació a aquest element.
- ✚ **GENERADOR FOTOVOLTAIC FV.** Es tracta d'un recurs energètic àmpliament emprat en aquest tipus de sistemes, ja que està ben correlacionat amb el perfil de càrrega mitjà, sobretot a nivell domèstic. Aquesta correlació es pot observar a la Figura 2.3.

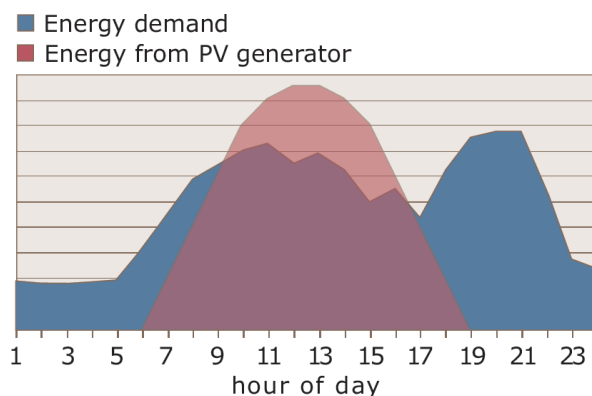


Figura 2.3. Correlació entre recurs solar i demanda energètica en un dia tipus. (Piqué 2017)


Es distingeixen diferents índex de penetració de l'energia solar fotovoltaica en aplicacions amb generadors dièsel. Aquests es recullen a la Taula 2.1.

Taula 2.1. Penetració del generador FV en microxarxes amb un grup electrogen.

Tipus de penetració	Característiques d'operació	Potència pic	Energia anual
Baixa	<ul style="list-style-type: none"> - El grup electrogen funciona a temps complet - La potència FV redueix la càrrega neta del generador - Tota l'energia solar es dirigeix cap a la càrrega primària - No hi ha sistema de control de supervisió 	< 50 %	< 20 %
Mitja	<ul style="list-style-type: none"> - El grup electrogen funciona a temps complet - Si el nivell de potència FV és alt, s'ha d'assegurar prou càrrega del generador dièsel - Requereix un sistema de control relativament simple 	50 % - 100 %	20 % - 50 %
Alta	<ul style="list-style-type: none"> - El grup electrogen pot desconnectar-se en cas de disponibilitat solar elevada - Es requereixen components auxiliars per regular el voltatge i la freqüència - Requereix un sistema de control sofisticat 	100 % - 400 %	50 % - 150 %

Cal destacar que tot i ser l'energia solar fotovoltaica el recurs més emprat en les microxarxes, existeix una gran varietat de microgeneradors (de tipus renovable o no) que es poden fer servir:

- Motor de combustió interna (10 kW a 10 MW)
- Miniturbines de combustió (0,5 MW a 50 MW)
- Microturbina (20 kW a 500 kW)
- Cel·les de combustible (1 kW a 10 MW)
- Turbines eòliques (30 W a 10 MW)
- Recuperadors de calor residual o generació combinada de calor i electricitat (CHP)

 **GRUP ELECTROGEN.** En nombroses ocasions, fa la mateixa funció que la xarxa elèctrica en instal·lacions amb possibilitat de connexió a la xarxa principal de subministrament, és a dir, com a suport o *backup*. Es tracta d'un element important en la microxarxa estudiada en aquest treball, ja que constitueix la font d'energia no renovable i, tenint en consideració l'objectiu de reduir l'impacte ambiental, es mirarà de reduir al màxim possible el seu ús.

Una característica rellevant de funcionament dels grups electrògens o *gensets* és el seu règim de treball. Aquest és òptim per a una càrrega de treball d'entre el 50 % i el 75 %. Segons alguns articles realitzats en la temàtica de sistemes híbrids amb la presència d'un *genset*, el mínim nivell d'operació del mateix es situa en l'aportació d'un 30 % de la seva potència nominal per tal de minimitzar errors mecànics. (Velasco et al. 2015) D'altra banda, ha de treballar amb un factor de potència que es trobi en la seva zona de funcionament segura (entre 0,8 i 1). La càrrega de treball a la que està sotmès un grup electrogen es calcula fàcilment seguint l'(Eq. 2.1).

$$\% \text{ càrrega} = \frac{P_{\text{demandada}}}{P_{\text{nominal}}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

El consum de combustible del *genset* depèn d'aquesta càrrega. No es tracta d'una relació lineal, ja que els grups electrògens han de girar a una velocitat mínima per compensar les seves pèrdues (ralentí). Per tant, per una càrrega molt reduïda, el consum no serà pràcticament nul, sinó que seguirà el comportament establert per la corba de consum del generador en qüestió.

Solen haver dos valors de potència per a aquests generadors: la potència d'arrencada i la potència nominal. Això vol dir que a l'hora d'encendre l'equip, es requereix un pic de potència superior a la potència nominal per a seguir treballant.

Per seguretat i per a possibles necessitats futures, el *genset* es sol sobredimensionar, augmentant un 20 % més de potència.

Els components principals d'un grup electrogen són:

- Motor de combustió interna
- Generador de corrent altern
- Unitat de transferència o *Transfer Switch*
- Circuit de control de transferència
- Circuit de control d'arrencada i aturada
- Instruments de mesura
- Control electrònic basat en un microprocessador
- Tanc de combustible
- Silenciador

A banda del motor de combustió interna, es requereix un motor d'arrencada (elèctric o pneumàtic) per vèncer l'estat de repòs en el que es troba el motor de combustió interna. Aquest motor d'arrencada es desconnecta quan el motor de combustió arriba a un 20-30 % de la seva velocitat nominal.

L'estàndard industrial ISO 8528.1 classifica els grups electrògens en quatre grups segons l'aplicació: (Velasco 2015)

- Potència de reserva d'emergència o *Emergency Standby Power* (ESP)
 - Ús màxim: 200 hores per any
 - Potència de sortida mitjana (24 h): 70 %
 - No suporta sobrecàrrega
 - No és adient per aplicacions de paral·lelisme amb la xarxa
- Potència de temps limitat o *Limited Time Running Power* (LTP)
 - Ús màxim: 500 hores per any (300 hores de forma contínua)
 - Potència de sortida mitjana (24 h): 70 %
 - No suporta sobrecàrrega
 - No és adient per aplicacions de paral·lelisme amb la xarxa
- Potència primària de funcionament o *Prime Running Power* (PRP)
 - Ús màxim: Operació contínua
 - Potència de sortida mitjana (24 h): 70 %
 - No suporta sobrecàrrega
 - Es permet operació amb paral·lelisme amb la xarxa
- Potència de funcionament contínua o *Continuous Operating Power* (COP)
 - Ús màxim: Operació contínua
 - Potència de sortida mitjana: 80 % - 100 %
 - No suporta sobrecàrrega

- Es permet operació amb paral·lelisme amb la xarxa

Els grups electrògens també es poden classificar segons la seva velocitat de rotació:

- Velocitat constant (velocitat síncrona). La Taula 2.2 mostra les diferents velocitats associades a la freqüència i al nombre de parells de pols de la màquina.
- Velocitat variable. En funció de la tecnologia, es poden trobar velocitats des de 800 rpm fins a 3200 rpm.

Taula 2.2. Generadors dièsel de velocitat constant. (Velasco 2015)

Freqüència	1 parell	2 parells	3 parells	4 parells	5 parells	6 parells
50	3000 rpm	1500 rpm	1000 rpm	750 rpm	600 rpm	500 rpm
60	3600 rpm	1800 rpm	1200 rpm	900 rpm	720 rpm	600 rpm
	Velocitat alta		Velocitat mitjana		Velocitat baixa	

🚦 **SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA.** Existeixen diferents tipus d'emmagatzematge d'energia elèctrica. La classificació més interessant d'aquests sistemes és en funció de la tecnologia, tal i com s'observa a la Taula 2.3

Taula 2.3. Sistemes d'emmagatzematge d'energia elèctrica segons la tecnologia. (Piqué 2017)

Tecnologia	Sistema d'emmagatzematge
Mecànica	Hidràulica de bombeig
	Aire comprimit
	Volant d'inèrcia
Electroquímica	Bateries secundàries (Pb-Àcid, NiCd [mediambientalment obsoletes per l'acció de la Directiva relativa a la restricció de substàncies perilloses o RoHS], NiMH, Li, NaS)
	Bateries de flux (Flux redox, Flux híbrid)
Química	Hidrogen
Elèctrica	Supercondensadors
	Superconductors
Tèrmica	Emmagatzematge de calor sensible (Sals foses)

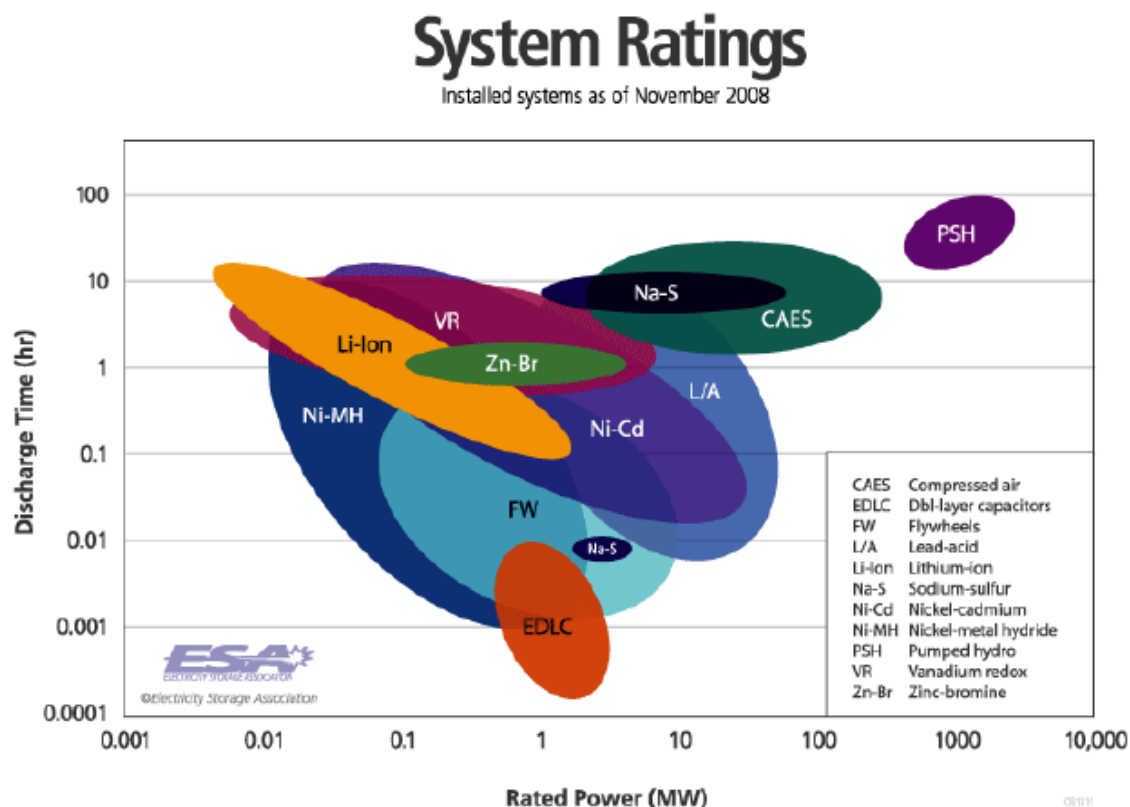


Figura 2.4. Relació entre el temps de descàrrega i la potència nominal dels diferents tipus d'emmagatzematge.
(Villafáfila 2016)

La Figura 2.4 representa gràficament els diferents tipus d'emmagatzematge descrits anteriorment en funció del rang de la seva potència nominal i del temps de descàrrega.

✚ **CÀRREGUES.** El criteri bàsic per classificar els consums de la microxarxa és la seva prioritat. Així doncs, els tipus de càrrega possibles són:

- Càrregues de baixa prioritat o no crítiques. Es tracta d'un tipus de demanda que pot ser desconnectada en cas d'escassetat d'energia.
- Càrregues desplaçables. Es tracta d'un tipus de demanda flexible pel que fa a la seva programació.
- Càrregues crítiques. Es tracta d'un tipus de demanda que ha de ser suplerta en el moment i durant tot el temps que requereixin.

2.1.3. Tipus

Les microxarxes elèctriques poden classificar-se segons diferents criteris, entre els quals es troben:

❖ Segons el tipus de tensió:

- AC
- DC
- Mixtes

❖ Segons la distribució:

- Monofàsica
- Trifàsica
- Trifàsica i neutre

❖ Segons la tensió:

- Baixa (LV)
- Mitja (MV)

❖ Segons l'estructura:

- Radial
- Anell

2.1.4. Beneficis

La implantació de microxarxes elèctriques dóna lloc a una sèrie de beneficis: (Villafàfila 2017)

- ❖ Millores en la seguretat de subministrament mitjançant la consideració de càrregues crítiques.
- ❖ Potència de reserva per millorar la fiabilitat i la seguretat de subministrament.
- ❖ Qualitat de servei (control de reactiva i tensió) segons requisits de l'usuari.
- ❖ Capacitat per reduir els pics de consum.
- ❖ Optimització del benefici econòmic mantenint el nivell adequat de confort dels usuaris, participant en el mercat de forma agregada.
- ❖ Integració de generació distribuïda amb reducció de pèrdues i de costos d'inversió en xarxes de transmissió i distribució.
- ❖ Maximitzar l'ús de fonts renovables d'energia.

2.2. Sistemes híbrids

Es defineix com a Sistema Energètic Híbrid o *Hybrid Energy System* (HES) a aquell tipus de sistema que combina múltiples tipus de recursos energètics basats en energies renovables (RES) i sistemes d'emmagatzematge d'energia amb un generador dièsel com a suport.

D'entre les diverses definicions de HES trobades a diferents articles, se n'ha destacat una lleugerament diferent de la esmentada anteriorment. Un Sistema Híbrid d'Energia (també conegut com a Sistema Híbrid d'Energies Renovables) “consisteix en dos o més recursos energètics, amb almenys un d'ells renovable i integrat amb equipament de control de potència i un sistema opcional d'emmagatzematge”. (Martínez Díaz 2017)

La Figura 2.5 mostra un esquema de blocs senzill que representa un HES.

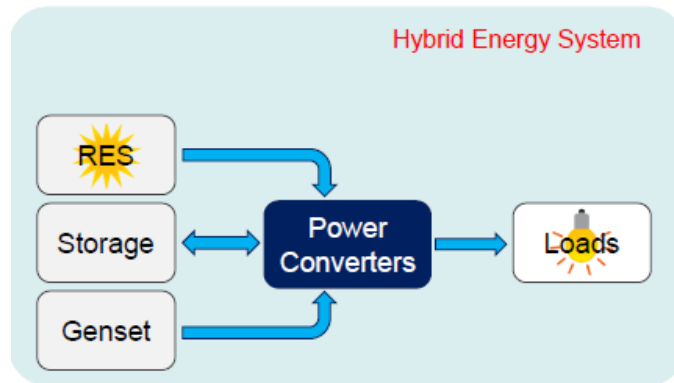


Figura 2.5. Diagrama de blocs d'un *Hybrid Energy System*. (Piqué 2017)

Adicionalment, un sistema híbrid d'energia també pot incorporar una connexió a la xarxa principal que podria utilitzar-se com a solució de suport en cas d'apagades. Un inversor adient i dissenyat per ser emprat en sistemes híbrids és l'Axpert MKS, el qual s'utilitzarà en la part pràctica d'aquest projecte. (Voltronic Power)

3. Descripció de l'escenari estudiat

En aquest apartat es descriu la microxarxa elèctrica que s'estudia en aquest treball. Es tracta d'una microxarxa aplicada a l'àmbit domèstic. Aquest factor condiciona el tipus d'instal·lació, que és monofàsica AC de baixa tensió. S'ha decidit que sigui un sistema aïllat de la xarxa principal de subministrament. La producció energètica és una combinació de recursos renovables i no renovables.

3.1. Localització

Es parteix d'uns consums elèctrics d'un habitatge, concretament un pis on hi viu una família de quatre persones. Aquest pis correspon a la residència familiar de l'autor d'aquest treball. Es tracta del municipi de Cornellà de Llobregat, que forma part de l'Àrea Metropolitana de Barcelona. Aquesta localització és emprada per obtenir dades meteorològiques, entre d'altres. Les coordenades corresponents a aquesta localització són: $41^{\circ} 21' 42,2''\text{N}$, $2^{\circ} 04' 44,0''\text{E}$.



Figura 3.1. Localització de l'habitatge d'aplicació de la microxarxa. («Google Maps»)

El tipus de microxarxa a estudiar en aquest treball està més aviat pensada per cases unifamiliars, situades als afores de les grans ciutats. Tanmateix, el perfil de càrrega mesurat en el pis de Cornellà permetrà disposar d'uns consums domèstics típics.

3.2. Fonts de producció energètica i emmagatzematge

✚ **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.** El concepte de microxarxa elèctrica sol incloure una o més fonts d'energia de tipus renovable. En aquest cas, el recurs renovable emprat és el solar. La font prioritària per satisfer els consums de la instal·lació serà l'energia provinent d'un conjunt de mòduls fotovoltaics. La raó per la qual s'ha escollit aquesta font d'energia renovable és perquè es tracta d'un recurs energètic molt popular i està entre les diverses instal·lacions que integren energies renovables. Aquest ús generalitzat a nivell mundial ha comportat una gran davallada del preu d'aquesta tecnologia en els darrers anys, la qual cosa constitueix un altre motiu d'elecció d'aquest recurs.

La Figura 3.2 mostra l'evolució del preu de diferents tipus de mòduls venuts a Europa. La davallada del preu per tots els tipus de mòdul és evident.

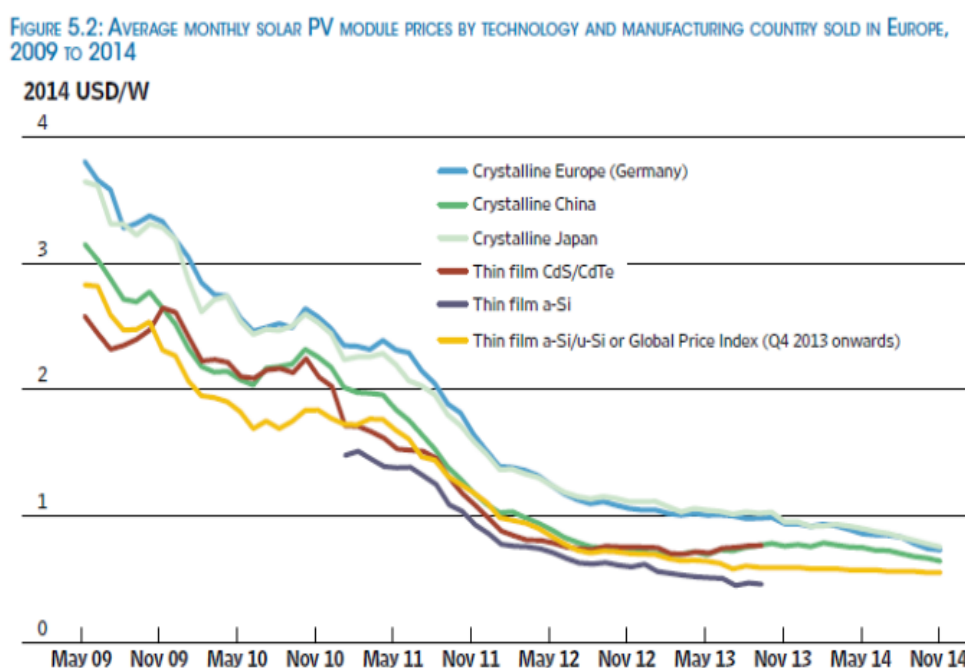



Figura 3.2. Evolució del preu de diferents tipus de mòduls fotovoltaics des de l'any 2009 fins l'any 2014.
(Instituto de Energía Solar 2017)

✚ **BATERIES.** Donada la intermitència i la imprevisibilitat del recurs solar, es decideix instal·lar un sistema d'emmagatzematge, en forma de bateries. Aquestes permetran satisfer els consums de la llar quan el recurs solar sigui insuficient o nul. La funció esperada de les bateries és satisfer els pics de producció, quan la generació

fotovoltaica sigui molt superior a les necessitats energètiques, i els pics de consum, quan el recurs solar sigui insuficient per a certs nivells de potència demandada.

 **GRUP ELECTROGEN.** Les bateries abans esmentades estan dissenyades per a un cert temps màxim d'autonomia. Per aquest motiu, es requereix un sistema energètic de suport o *backup* per la situació en que ni la irradiació solar ni l'energia acumulada a les bateries sigui suficient. Una funció important del generador és la de carregar les bateries quan els consums siguin elevats i la producció fotovoltaica sigui reduïda.

La combinació d'aquest grup electrogen i l'energia solar fotovoltaica dóna l'atribució d'híbrida a la microxarxa dissenyada. Ja que una de les intencions més importants de la popularització de les microxarxes és una major utilització de les energies d'origen renovable, l'objectiu d'aquest treball és reduir l'ús del *genset* al màxim. Minimitzar les hores de funcionament del grup electrogen, i el consegüent consum de combustible, també permet augmentar la rendibilitat de la instal·lació. El motiu és el creixement que estan experimentant alguns combustibles fòssils en els darrers anys. A la Figura 3.3 es mostra una gràfica on s'observa l'evolució del preu del dièsel, que és el combustible més emprat en els *gensets*, entre els anys 2005 i 2017 (corba vermella). Es pot comprovar que després d'una davallada del preu a partir de l'any 2012 i 2013, des de l'any 2016 el preu es troba novament en augment.

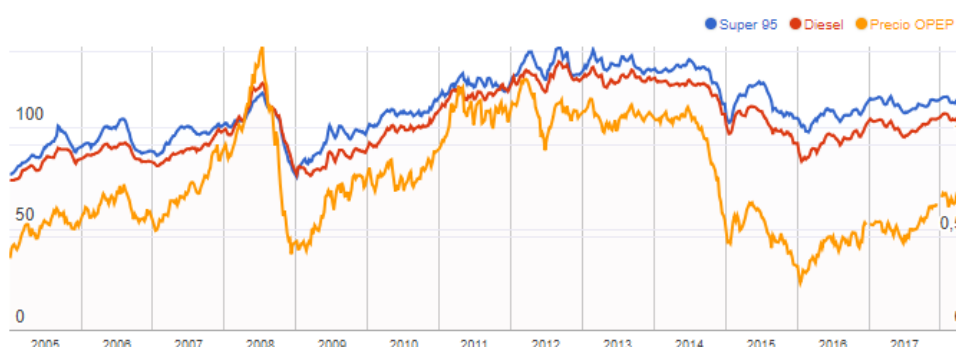


Figura 3.3. Evolució del preu del dièsel (en €/l) des de l'any 2005 fins l'any 2017. (datosmacro.com)

Entre els diferents tipus de microxarxes elèctriques existents a l'actualitat, és freqüent la connexió a la xarxa elèctrica, podent-se desconnectar d'aquesta quan la producció pròpia de la microxarxa és suficient per cobrir la demanda. Així doncs, la xarxa principal de subministrament pot exercir la funció de sistema de suport, podent reduir considerablement la mida del sistema d'emmagatzematge. En l'escenari estudiat en aquest treball, la funció de suport és desenvolupada pel grup electrogen.

Seguidament es presenten els motius principals pels quals en aquest treball s'ha decidit prescindir de la connexió a la xarxa elèctrica.

- La factura elèctrica amb les grans companyies subministradores d'energia a Espanya sovint resulta excessivament costosa en relació a l'energia consumida. Això és degut a l'alt preu a pagar per potència contractada i pels diferents impostos i peatges. Un sistema energètic aïllat com la microxarxa estudiada permet estalviar-se aquest tipus de sobre costos.
- La normativa espanyola actual en relació a aquest tipus de sistemes energètics és força restrictiva, la qual cosa dificulta i encareix la implantació de microxarxes elèctriques amb connexió a xarxa. Una microxarxa autònoma permet actuar al marge d'aquesta normativa i estalviar diners relatius als impostos i tràmits, augmentant així la rendibilitat de la instal·lació.
- Actualment el *mix* energètic del país té una forta presència de fonts energètiques basades en combustibles fòssils i, per tant, contaminants. Un consumidor amb contracte amb una de les grans empreses elèctriques que controlen el sector energètic no pot triar l'origen de l'energia que li arriba al seu punt de consum. Les microxarxes elèctriques aïllades aplicades a l'àmbit domèstic, entre d'altres sectors, representen un mode d'escollir el tipus de fonts energètiques que es cregui més convenient per a satisfer la demanda del punt de consum. D'aquesta manera es potenciaria l'ús d'energies renovables i es contribuiria a la confecció d'un nou model energètic més sostenible, descentralitzat i respectuós amb el medi ambient. Cal destacar, però, que actualment estan cobrant força certes empreses subministradores o comercialitzadores d'energia verda, com SomEnergia, que sí garanteix un origen renovable 100% de l'energia que consumeix el llient.
- L'estudi i implantació de microxarxes autònomes no només beneficia aquells que volen deixar de dependre de les grans companyies elèctriques, sinó que resulta un tipus d'instal·lació realment important i de gran utilitat per a habitatges i altres punts de consum situats en zones remotes on l'accés a la xarxa elèctrica és impossible o molt difícil. A més, aquests sistemes energètics són també indicats per a zones on la qualitat de subministrament és reduïda, amb una gran ocurrència d'apagades o talls de subministrament.

3.3. Consums energètics

Els consums energètics de la microxarxa s'extreuen directament de l'habitatge comentat a través de la mesura dels mateixos amb un equipament adient. Les dades mesurades es tracten de manera conjunta, és a dir, sense distingir càrregues segons la seva prioritat, ja que no és especialment rellevant per l'objectiu d'aquest treball.

Degut al fet que les càrregues de la microxarxa són en corrent altern (AC) i la generació fotovoltaica, d'igual forma que les bateries, és en corrent continu (DC), es requereix equipament electrònic que permeti fer la conversió adient. Un inversor és l'encarregat de realitzar la conversió de DC a AC. Per a

aplicacions amb generació renovable (típicament solar fotovoltaica o eòlica), l'inversor sol incorporar un algoritme MPPT per aconseguir extreure la màxima potència possible dels mòduls fotovoltaics. El mateix inversor (per exemple, l'inversor comercial de la marca Axpert) s'encarrega d'adequar el valors de tensió en contínua entre els mòduls fotovoltaics i el sistema de bateries.

3.4. Esquema de blocs

A la Figura 3.5 es mostra un esquema de blocs on s'hi poden veure els diferents elements que configuren la microxarxa estudiada. Per confeccionar aquest diagrama, s'ha agafat com a base el diagrama de blocs funcional de l'inversor Axpert que s'emprarà en la part pràctica del projecte, que es pot veure amb detall a la Figura 3.4.

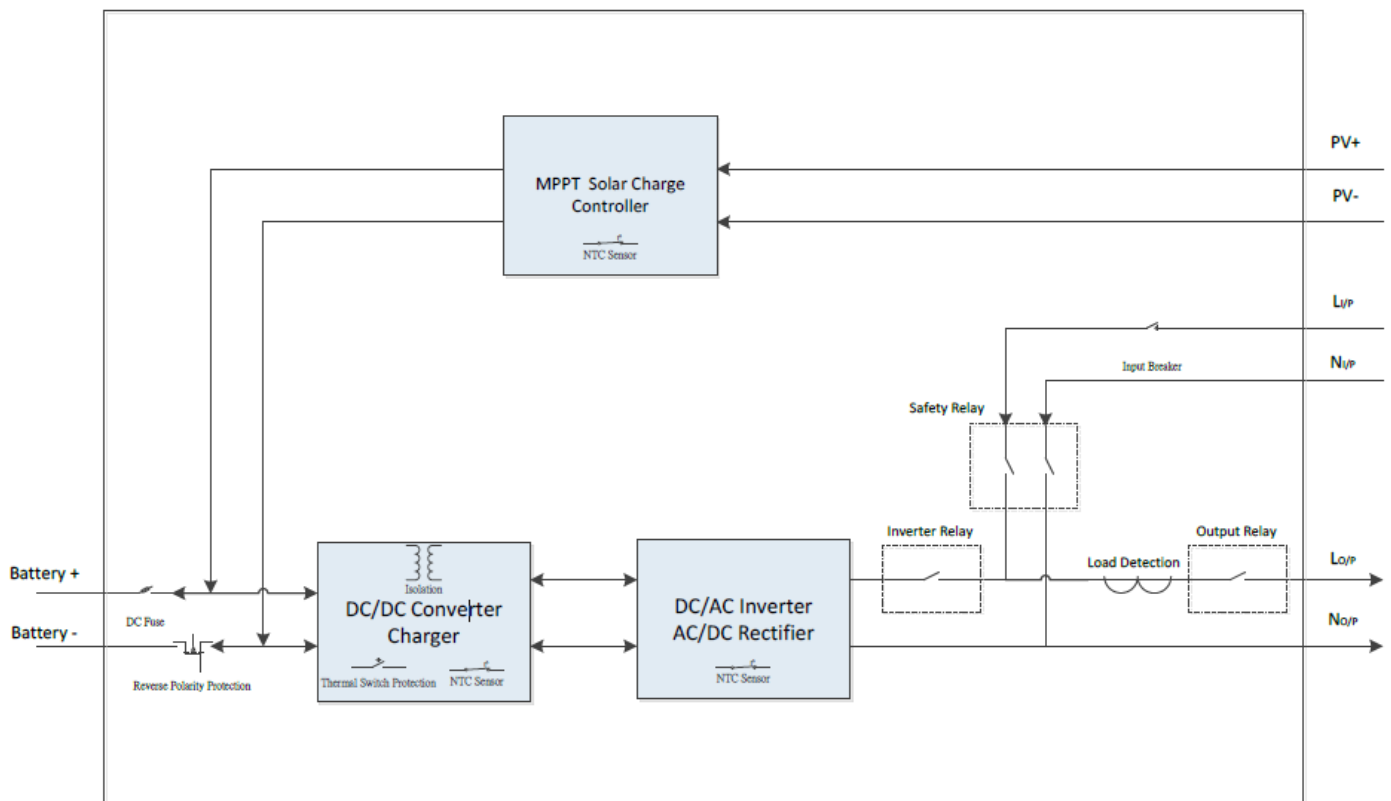


Figura 3.4. Diagrama de blocs funcional de l'inversor Axpert sèrie MKS 4 kVA a 5 kVA. (Voltronic Power)



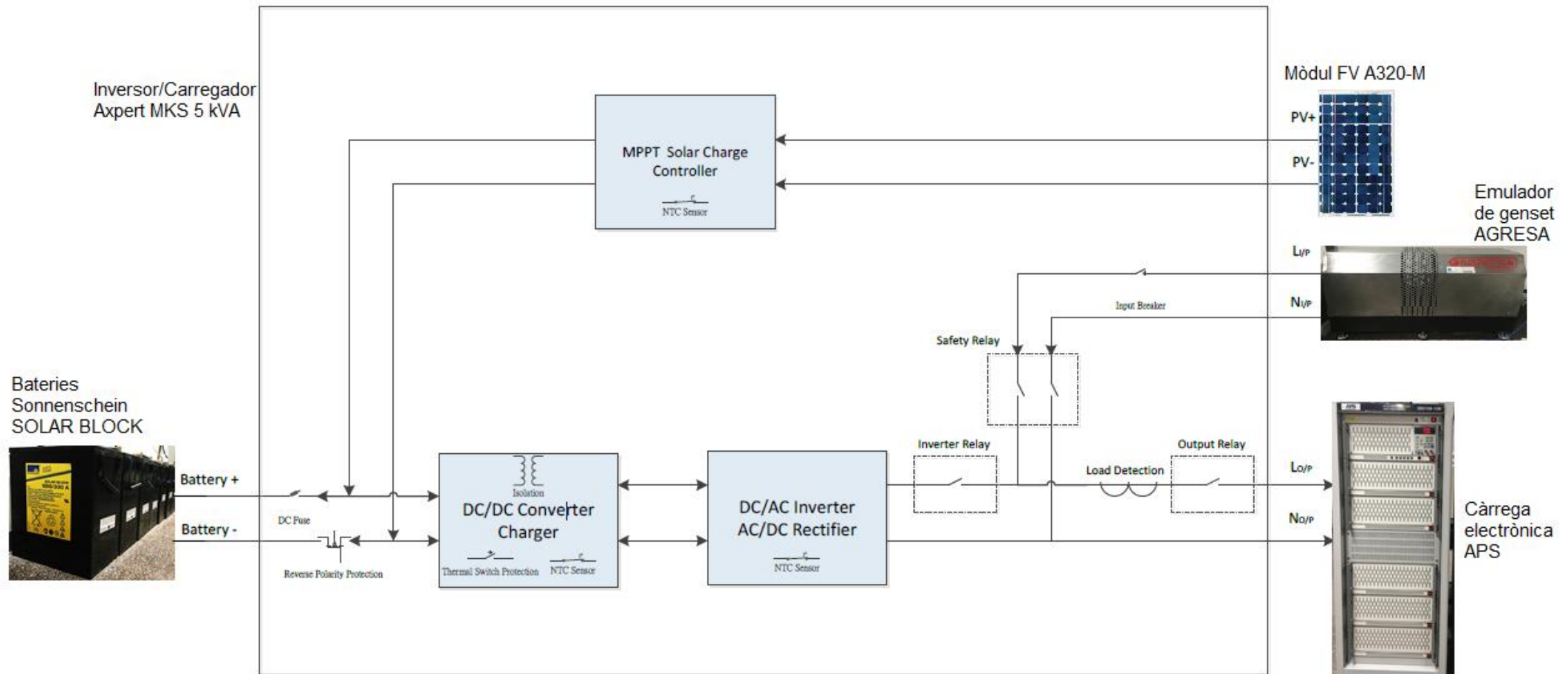


Figura 3.5. Esquema de blocs funcional de la microxarxa d'estudi.

4. Dimensionament

En aquest apartat es procedeix a realitzar el dimensionament de la instal·lació. El software emprat és HOMER Pro®.

“El programari HOMER Pro® microgrid de HOMER Energy és l'estàndard mundial per optimitzar el disseny de microxarxes en tots els sectors, des de la potència d'un poble i serveis energètics a illes fins a campus i bases militars connectades a la xarxa. Originalment va ser desenvolupat al Laboratori Nacional d'Energies Renovables dels Estats Units, i millorat i distribuït per HOMER Energy, HOMER (Híbrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) nidifica tres poderoses eines en un producte de programari, de manera que l'enginyeria i l'economia treballen conjuntament”. («HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids»)

HOMER és un programa que permet modelar generadors fotovoltaics, eòlics, hidràulics, basats en biodièsel, grups electrògens, microturbines de gas, bateries, electrolitzadors i piles de combustible. Els sistemes energètics dissenyats poden estar connectats o no a la xarxa elèctrica. El dimensionament fet amb el programa HOMER permet identificar diferents escenaris d'estudi combinant les fonts d'energia seleccionades, el sistema d'acumulació i els consums. El paràmetre principal en que es basa aquest programari per optimitzar el disseny del sistema per cada escenari és el NPC o valor actual net (VAN).

4.1. Monitorització de consums

A l'hora de dur a terme el dimensionament de qualsevol microxarxa elèctrica, es parteix dels consums de la instal·lació. Com ja s'ha dit anteriorment, l'àmbit d'aplicació de la microxarxa a dimensionar és domèstic. En aquest tipus de microxarxes, els consums poden ser calculats manualment, partint de la potència nominal dels diferents electrodomèstics i aparells consumidors d'energia, del temps de funcionament d'aquests i d'un coeficient que fa referència a la simultaneïtat de totes aquestes càrregues. Tanmateix, en aquest projecte s'ha decidit mesurar aquests consums directament a l'habitatge especificat, situat a Cornellà de Llobregat. La mesura s'ha realitzat amb un monitor d'energia de la firma Smappee. Tot seguit s'explica breument el funcionament i les característiques principals d'aquest dispositiu.

El monitor Smappee està pensat especialment per aplicacions domèstiques. Aquest aparell mesura els consums dels diferents electrodomèstics de la llar i la producció dels panells solars, si s'escau. Mitjançant un dispositiu electrònic, com un telèfon intel·ligent o *smartphone*, una *tablet* o un

ordinador, es poden conèixer els consums en temps real i descarregar o exportar l'històric de dades de consum que el monitor va enregistrant. Una imatge del monitor es pot trobar a la Figura 4.1 .



Figura 4.1. Smappee Energy Monitor. («Smappee reports energy consumption for all your home appliances | TechHive»)

La Figura 4.2 permet observar els diferents elements que intervenen en la mesura dels consums de l'habitatge amb Smappee. Aquests elements són la caixa de fusibles o quadre elèctric de l'habitatge on connectar els sensors del monitor, un *router* Wi-Fi amb el qual el monitor es pugui connectar a la xarxa d'internet de l'habitatge, un servei en línia (Smappee Cloud), que emmagatzema les dades mesurades i permet a l'usuari descarregar-les en qualsevol moment, i l'aplicació mòbil, que permet interactuar amb l'usuari d'una manera que s'explicarà més endavant.

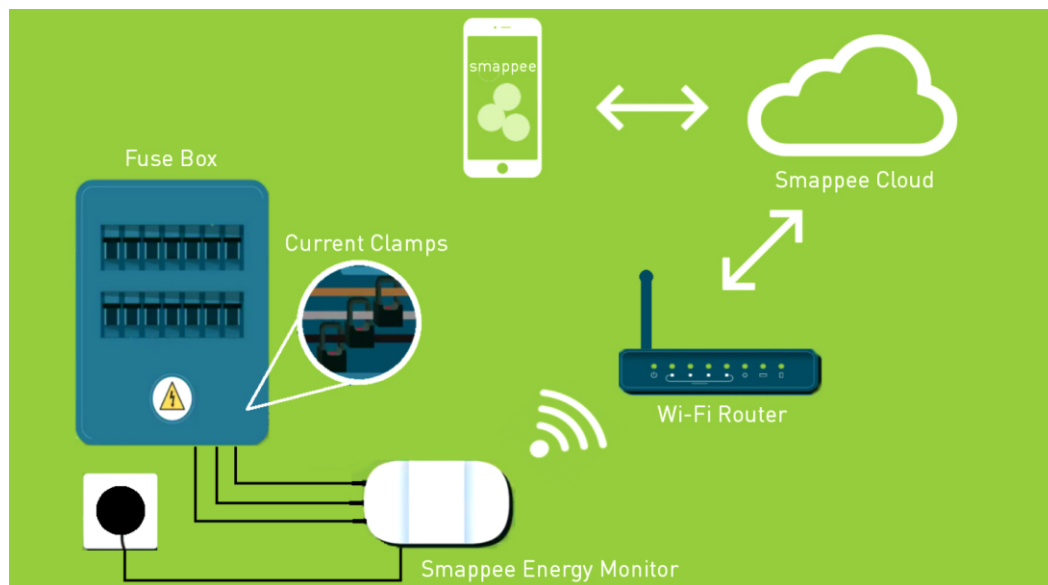


Figura 4.2. Esquema d'elements que intervenen en la mesura dels consums amb Smappee. («Smappee (Solar) Energy Monitor Installation Manual» 2017)

La instal·lació d'aquest monitor d'energia és molt senzilla:

- Cal localitzar el quadre elèctric i el comptador de l'habitatge.
- Després d'haver desactivat l'interruptor general per motius de seguretat i d'haver retirat la tapa del quadre elèctric, es connecta el sensor de corrent al cable provinent del comptador corresponent a la fase de la instal·lació elèctrica (cal destacar que es tracta d'una instal·lació monofàsica). El sensor de corrent consisteix en una pinça amperimètrica. És important col·locar aquest sensor de forma que la fletxa que hi té dibuixada segueixi el flux d'energia (sortint del comptador i dirigint-se als consums).
- El següent pas és connectar el monitor a un endoll proper. A través del cable d'alimentació, s'aconsegueix la mesura de la tensió.
- Un cop realitzades les connexions anteriors, es retorna la potència a la llar i es sincronitza el monitor amb la xarxa Wi-Fi. Aquest procediment es duu a terme mitjançant l'aplicació mòbil.
- L'anàlisi del funcionament del monitor i dels possibles errors que puguin sorgir es realitza a través de la identificació de diverses tonalitats de llum que emet el dispositiu. Després de seguir les passes indicades a l'aplicació, si la llum emesa pel monitor és verda i pampalluga, el procés d'instal·lació i configuració es pot considerar satisfactori. En aquest moment, ja es pot consultar el consum de l'habitatge en temps real a través d'unes bombolles indicadores de potència activa presents a la pantalla principal de l'aplicació, que t'informen de la potència activa demanda a cada instant i de la potència de sempre en ús o *stand-by*.

A la Figura 4.3 es pot observar la instal·lació del monitor a l'habitatge de l'autor del treball.



Figura 4.3. Instal·lació del monitor Smappee a l'habitatge estudiat.

Les especificacions principals del monitor Smappee es presenten a la Taula 4.1.

Taula 4.1. Característiques tècniques del monitor Smappee. («Smappee (Solar) Energy Monitor Installation Manual» 2017)

Especificacions tècniques	
Dimensions	16 cm (llarg) X 10 cm (ample) x 3,5 cm (alt)
Pes	300 g
Wi-Fi	802.11 b/g/n 2,4 GHz
Temperatura de treball	5°C a 40°C
Temperatura d'emmagatzematge	-10°C a 60°C
Humitat relativa	0-80%
Segellat IP 20	
Altitud de treball	0 a 2000 m
EMC	EN 55022 (Classe B)
Categoria de sobretensió	300 V / Categoria II
~ 110 V a 240 V i 50 Hz a 60 Hz, Màx. 5 kW	

La funció més interessant del sistema de monitorització descrit és la d'exportar un conjunt de dades de consum enregistrades durant el temps que calgui. L'interval de temps mínim amb que es poden descarregar les dades de consum és de 5 minuts. A través de l'aplicació mòbil o l'ordinador, es pot

accedir a les corbes corresponents al perfil de càrrega de l'habitatge el dia seleccionat. Seguidament, la Figura 4.4 mostra la representació del perfil de càrrega de l'habitatge estudiat en el dia 27 de maig del 2018.

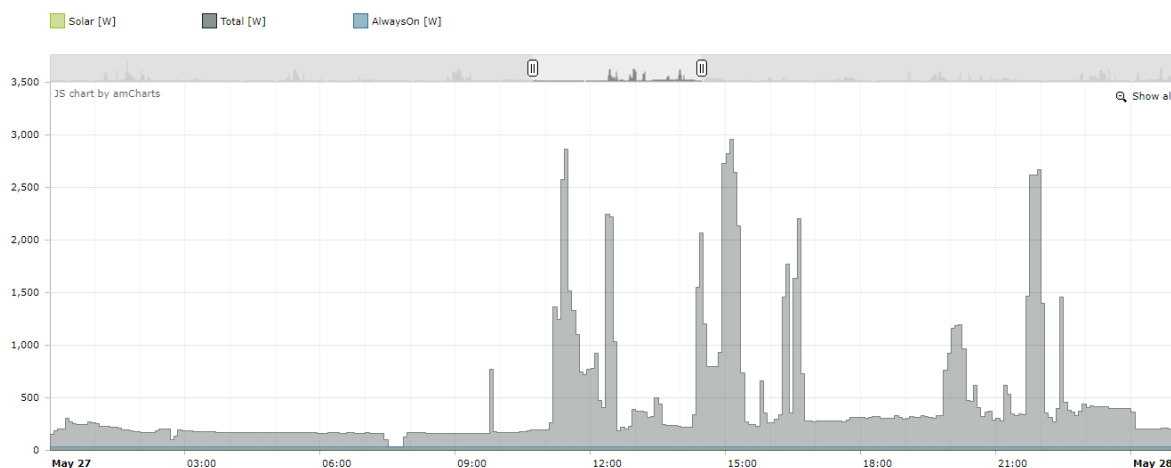


Figura 4.4. Perfil de càrrega de l'habitatge el 27 de maig de 2018. Extret del servidor online de Smappee.

Altres funcions útils que ofereix aquest equip de monitorització és la identificació dels consums de cada electrodomèstic per separat i la utilització d'un endoll intel·ligent. Després d'analitzar els consums de l'habitatge durant diversos dies, el monitor comença a separar-los i l'usuari pot establir de quin electrodomèstic es tracta en funció de les hores de posada en marxa i aturada i dels valors de potència activa que indica l'aplicació mòbil. El producte inclou un endoll intel·ligent o *Smart Comfort Plug* que permet activar-lo i desactivar-lo remotament quan es desitgi; és indicat per estalviar consums d'*standby* d'algun electrodomèstic o equip en concret.

4.2. Tractament de les dades de consum

Per realitzar el dimensionament de la instal·lació s'ha seleccionat un període de temps de quatre setmanes del mes d'abril del 2018 pel que fa a consums de l'habitatge. Aquest període de temps representarà el consum típic de la llar, ja que en l'època en que s'ha mesurat no es posen en marxa sistemes de gran consum energètic, com la calefacció o l'aire acondicionat (elèctrics).

Ja que el programa HOMER requereix un període d'un any sencer per importar-hi dades de consum, s'ha decidit repetir aquest període típic de quatre setmanes durant tot l'any. Per tractar una quantitat tan gran de dades, s'ha emprat el programari MATLAB, de la firma Mathworks. («MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico») El codi del programa s'inclou als annexos d'aquest treball. Les funcions que realitza el programa desenvolupat és llegir les dades de consum de cada setmana del

període considerat (del 02 d'abril de 2018 al 29 d'abril de 2018), donat que aquestes es troben en un full de càlcul diferent, agrupar-les, representar-les gràficament i escriure-les en un arxiu de text, el qual serà importat al programa HOMER per fer el dimensionament. La representació gràfica obtinguda es mostra a la Figura 4.5.

La Figura 4.6 mostra en detall la corba de consum del dia 15 d'abril de 2018. Es pot comprovar que el pic de potència promig cinc-minutal assolit aquest dia és de 4,47 kW. És de destacar que la potència actual de l'habitatge contractada amb la companyia elèctrica és de 3,45 kW, de manera que aquesta potència és superada en un interval de temps determinat. No obstant això, el subministrament elèctric no ha sigut tallat en cap moment. La justificació d'aquest fet radica en el comportament físic dels interruptors magnetotèrmics que controlen la instal·lació elèctrica de la llar.

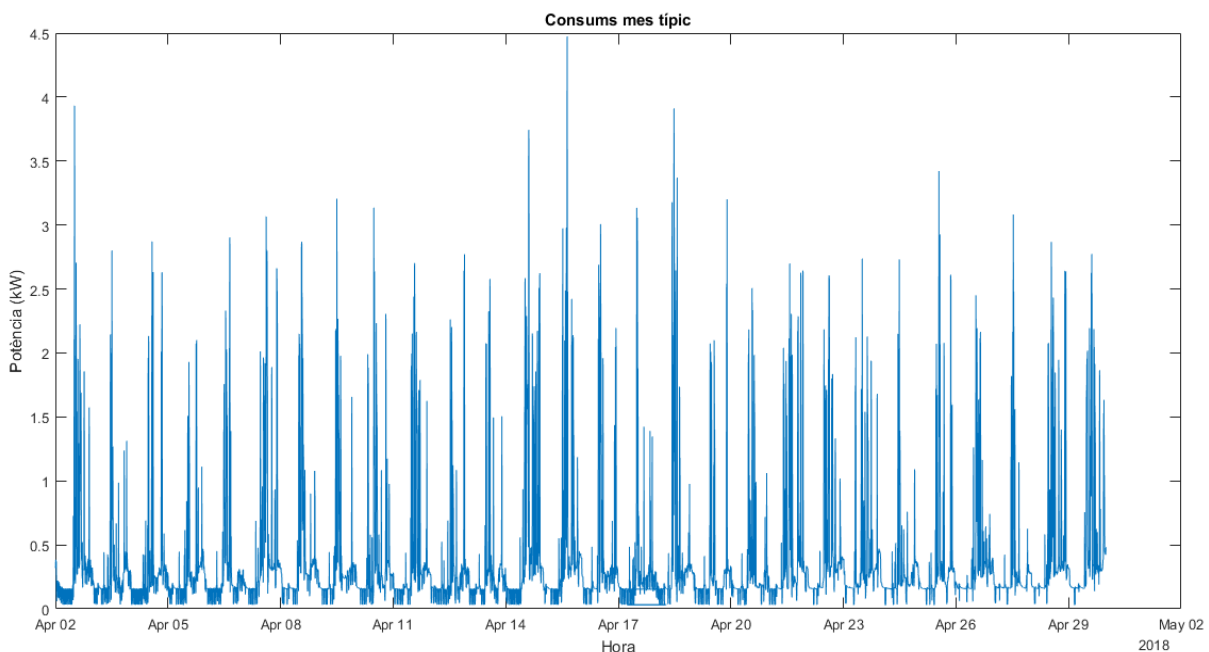


Figura 4.5. Representació dels consums de l'habitatge en el període considerat com a típic. Elaboració pròpia.

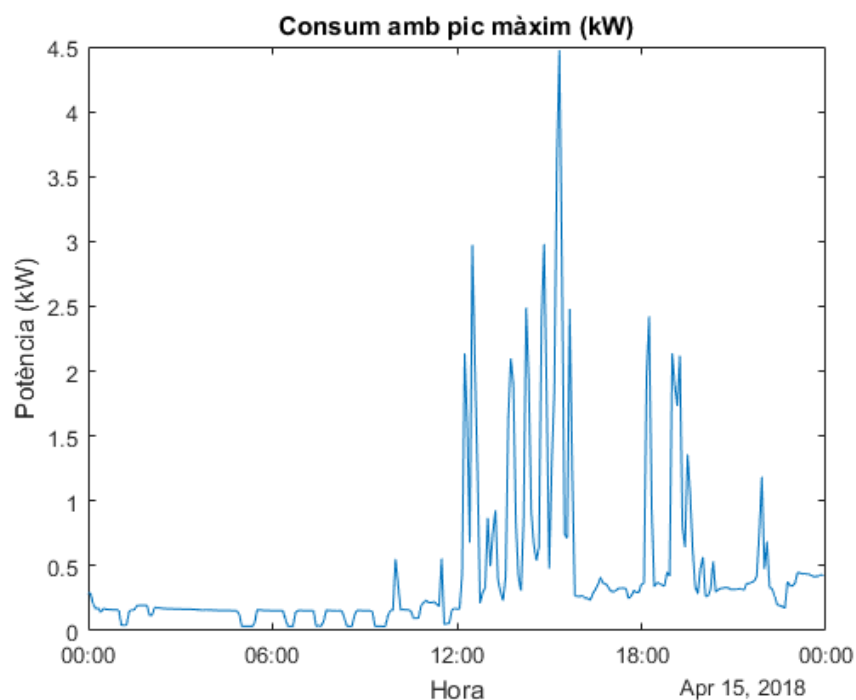


Figura 4.6. Representació dels consums de l'habitatge el dia 15 d'abril de 2018. Elaboració pròpia.

L'Interruptor de Control de Potència (ICP) és un interruptor magnetotèrmic encarregat de limitar la potència disponible en funció del contracte establert amb l'empresa subministradora d'energia. La funció d'aquest interruptor està sent realitzada pels nous comptadors intel·ligents de forma electrònica, però aquest no és el cas de l'habitatge estudiat. Les corbes de disparament que segueixen els ICP s'anomenen ICP-M i estan regulades per la normativa UNE 20.317. («Nergiza») Alguns aspectes que estipula aquesta normativa són:

- Si el corrent consumit supera en un factor 1,1 el corrent nominal (segons la potència contractada), el subministrament d'energia elèctrica no s'interromp en 1 hora com a mínim.
- Si el corrent consumit supera en un factor 1,5 el corrent nominal, el subministrament s'interromp en menys de 15 minuts aproximadament.

La Figura 4.7 mostra les corbes ICP-M comentades, d'on es pot extreure l'interval de temps aproximat en que es pot superar la potència contractada en funció de en quin factor el corrent de consum superi el corrent nominal. Es suposa, doncs, que la potència varia proporcionalment amb el corrent, ja que la tensió es manté constant a un valor d'uns 230 V.

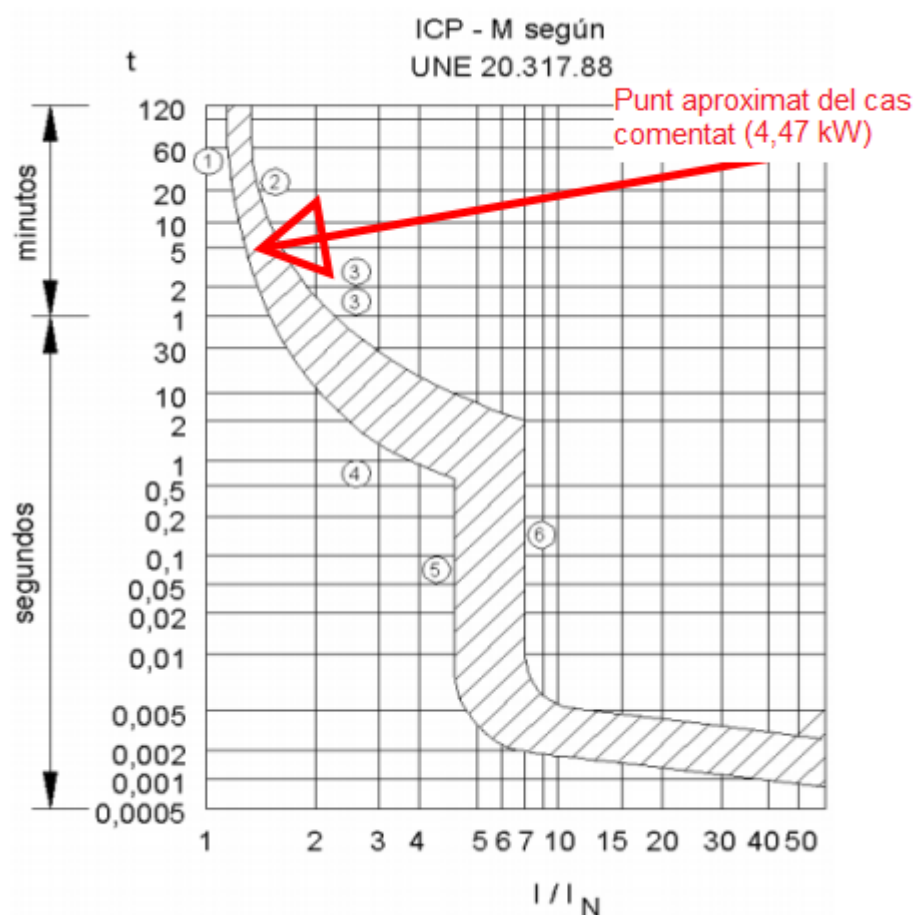


Figura 4.7. Corba de disparament ICP-M segons la UNE 20.317.88. («Interruptor magnetotérmico»)

En aquest cas, segons les dades extretes amb el monitor Smappee, s'ha comprovat que el temps en que es supera la potència contractada, i per tant el corrent nominal, és inferior a 10 minuts. Ja que el corrent consumit supera el nominal en un factor 1,3 aproximadament, el temps màxim (uns 10 minuts) no es veu superat. És aquest el motiu pel qual el subministrament elèctric en aquest habitatge no s'ha vist afectat tot i superar lleugerament la potència contractada.

4.3. Introducció de paràmetres al programa HOMER

Un cop ja s'han determinats els consums de la microxarxa, es procedeix a definir l'escenari a l'entorn del programa HOMER. Primerament es descriu breument el funcionament d'aquest programa.

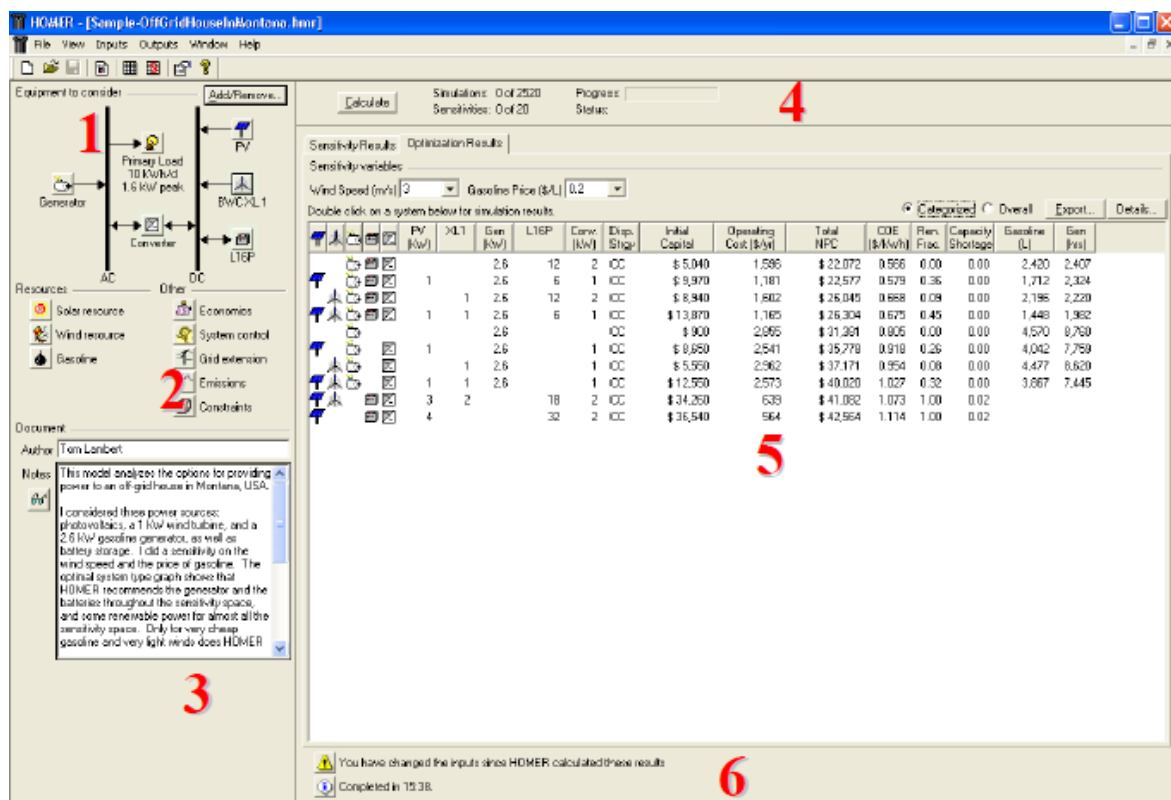


Figura 4.8. Finestra principal del programa HOMER. (Velasco)

La Figura 4.8 mostra les 6 regions principals de la finestra principal del programa. Tot seguit s'explica cadascuna d'aquestes regions:

1. *Equipment to consider* o Sistema considerat. En aquesta regió de la finestra principal de HOMER es mostra un esquemàtic amb els diferents elements que formen el sistema energètic que es desitja estudiar. Els elements s'organitzen automàticament formant un bus de contínua i un d'alterna segons el tipus d'equipaments que s'escullin. Aquesta part del programa també permet modificar les característiques de cadascun d'aquests elements.
2. *Resources* o Recursos. Els recursos energètics que cal definir en el programa venen determinats pels elements escollits en el sistema energètic desitjat.
3. *Document* o Documentació. En aquesta secció es permet introduir dades sobre l'autor del programa i els apunts que aquest cregui convenient.
4. Dades de la simulació. Aquesta regió és la corresponent a l'inici de la simulació. A banda d'iniciar la simulació, es proporciona informació a l'usuari sobre la mateixa, com el nombre de simulacions a realitzar i el temps de durada aproximat.
5. Resultats. Després d'haver-se completat les diferents simulacions, en aquesta zona es mostren els resultats obtinguts. Els diferents casos que s'obtenen com a resultats es disposen ordenats de forma ascendent segons el Total NPC o VAN. És possible accedir a

cadascun d'aquests casos i conèixer més detalls amb gran profunditat, combinant dades numèriques i representacions gràfiques.

6. Informació. Aquesta regió proporciona informació respecte el procés de simulació. D'una banda, es mostra el temps empleat en realitzar la simulació. Addicionalment, és freqüent l'aparició de suggeriments per tal de modificar el valor d'alguns paràmetres introduïts i, d'aquesta manera, fer més òptim el sistema.

A continuació s'expliquen els paràmetres introduïts al programa pel cas concret d'aplicació que s'estudia en aquest treball. Com ja s'ha dit, el primer pas es escollir els elements que formen el sistema energètic. En aquest cas, es tracta d'un generador fotovoltaic, un sistema de bateries, un grup electrogen i un convertidor per passar de corrent continu a altern o viceversa. En aquest apartat també s'hi introdueix el perfil de càrrega.

Els valors de demanda es poden introduir manualment per cada hora del dia i per cada mes. També és possible importar les dades d'un fitxer de text, que és la opció triada en aquest cas (a partir del fitxer de text creat amb MATLAB, com s'ha explicat anteriorment). Un cop introduïdes aquestes dades, el programa et realitza diverses representacions gràfiques interessants, entre les quals hi és el perfil de càrrega mensual (en aquest cas és igual per tots els mesos) i la corba monòtona de càrrega. Aquesta corba representa la freqüència de cada valor de potència activa consumida. La informació d'aquesta corba resulta útil per analitzar si cal dimensionar la instal·lació per a la potència pic demanda o si és més convenient evitar aquest sobredimensionament i emprar sistemes de suport que puguin adaptar més la seva potència generada. La Figura 4.9 mostra la corba monòtona de càrrega de la mixroxarxa d'estudi. Es pot comprovar que els valors d'hores en que s'ha igualat o superat una potència de 3 kW són molt més reduïts que la resta de valors de demanda. També s'observa que el valor de càrrega d'uns 100 W correspon a la potència més freqüent. Això és degut a que durant la nit és habitual que la demanda no superi una potència de 100 W a 150 W.

És de destacar que el valor màxim de temps (en hores) que figura a l'eix d'abscisses de la corba monòtona de càrrega és de 100 hores, període que correspon únicament a 4 dies. Això és degut a que HOMER et mostra una ampliació de les 100 hores més crítiques de les 8760 hores de tot un any.

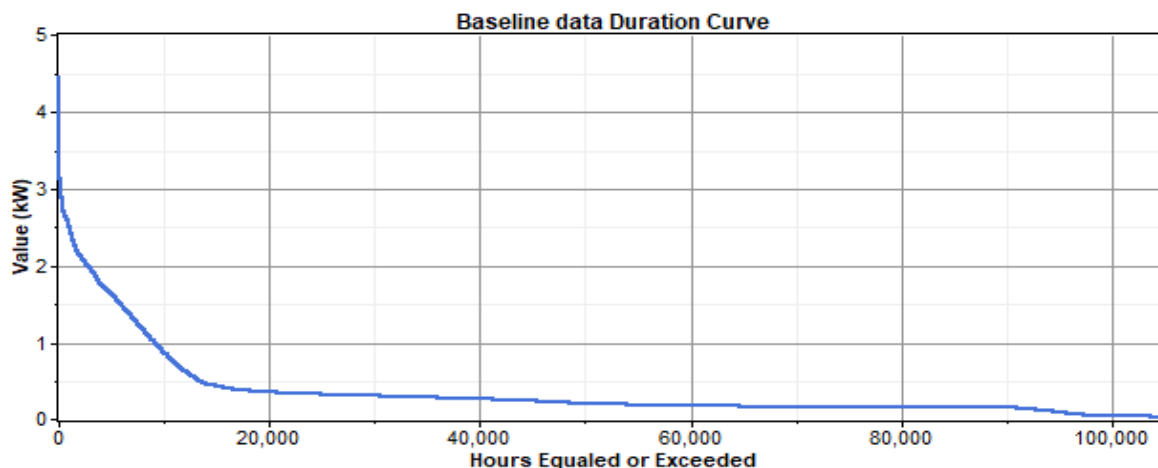


Figura 4.9. Corba monòtona de càrrega del cas estudiat. Extret de la simulació amb HOMER.

Pel que fa al generador fotovoltaic i el recurs solar, s'han introduït dades a partir del coneixement per experiència de l'autor del treball i de la cerca de valors típics. Es considera que per una quantitat de 3 kW de fotovoltaica, el cost o inversió és de 12000 €, el de reemplaçament, 1000 € i el de manteniment, prop d'un 20 % del cost capital (200 €). Les unitats monetàries amb les que treballa HOMER són els dòlars americans (\$), però com que es tracta d'una unitat arbitrària, es poden considerar euros en el seu lloc. S'ha indicat que l'angle d'inclinació dels panells sigui de 37°, valor obtingut a partir de la pàgina web PVGIS. («Photovoltaic Geographical Information System») Consisteix en un sistema d'informació geogràfica fotovoltaica. Una de les opcions d'aquest web és calcular l'angle òptim d'inclinació dels mòduls fotovoltaics, tenint en consideració la radiació solar a la localització escollida durant tot un any. També cal destacar que no es compta amb un sistema de seguiment solar, ja que en aplicacions domèstiques com l'estudiada no es sol disposar de prou espai. A més, és probable que aquest sistema augmentés el valor de la inversió econòmica a realitzar. Respecte el recurs solar, HOMER permet connectar-se a bases de dades com la de la NASA, de manera que només cal especificar les coordenades de la localització del sistema energètic a dissenyar i els valors de radiació diària en un dia típic de cada mes s'obtenen automàticament. El programa et permet graficar el perfil de recurs solar per cada mes. Aquest perfil es mostra a la Figura 4.10. Com és normal, és clarament notable que el recurs solar és més reduït als mesos d'hivern, mentre que és força elevat els mesos d'estiu.

Com a sistema d'emmagatzematge, es fan servir bateries. HOMER et permet seleccionar un model de bateria d'entre els que disposa a la seva base de dades. S'ha escollit el model 6FM200D, del fabricant Vision Battery, ja que la seva capacitat C_{20} és de 200 Ah (2,4 kWh) i la seva tensió és de 12 V. Es tracta de paràmetres prou adequats per aplicacions solars. S'ha d'especificar al programa quantes bateries s'inclouen per cada fila o *string*. Les tensions nominals típiques per a habitatges són 12 V, 24 V, 48 V i 120 V. Per potències demandades d'entre 1,5 kW i 5 kW, que correspon al cas estudiat, es recomana

generalment escollir una tensió nominal de treball de 24 V. Ja que les bateries tenen una tensió de 12 cadascuna, es requereixen dos bateries per *string* per tal de tenir una tensió de 24 V al bus de contínua. En relació al preu de les bateries, s'ha buscat quin és el seu valor, obtenint un cost d'uns 360 € cada bateria. («OSI Batteries»)

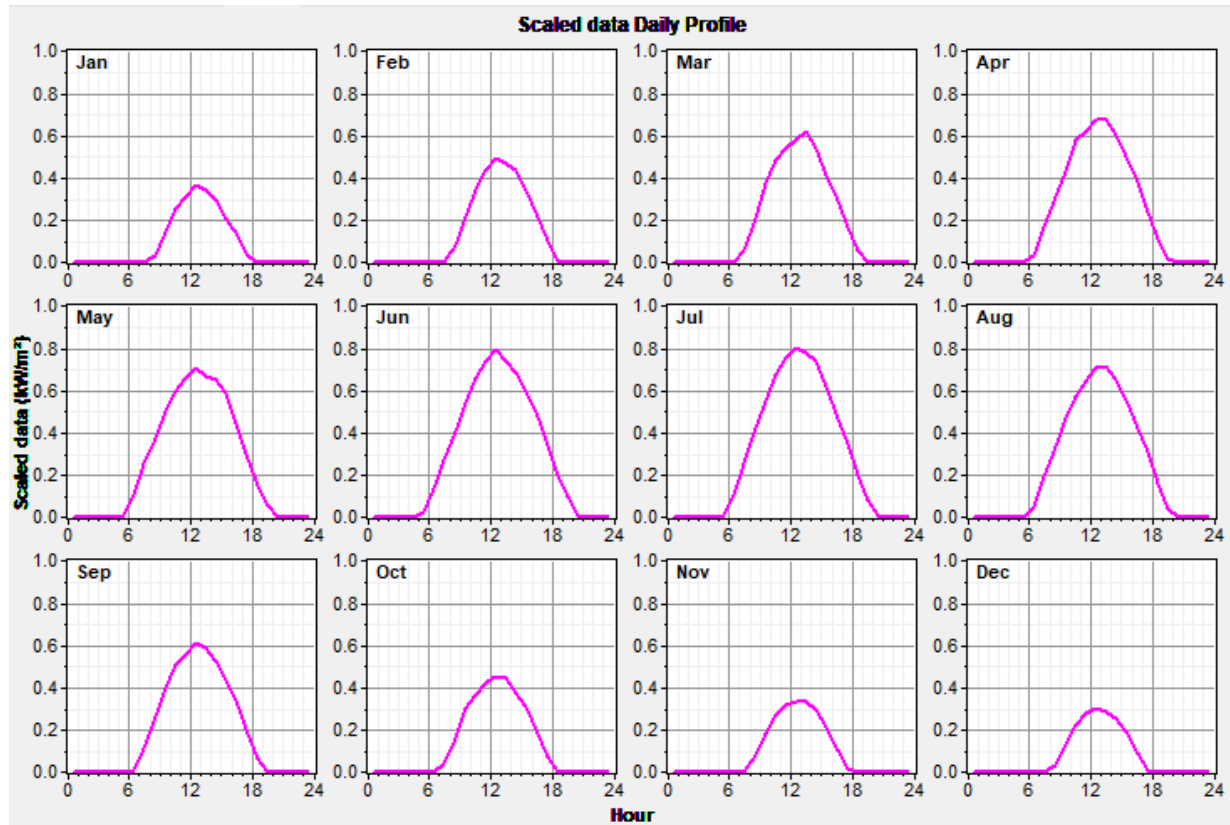


Figura 4.10. Perfil d'irradiància per un dia típic de cada mes. Extret de la simulació amb HOMER.

HOMER també et proporciona dades tècniques sobre el model de bateria escollit, així com una gràfica que mostra la relació entre la capacitat de la bateria i el corrent de descàrrega. Aquesta gràfica es mostra a la Figura 4.11 .

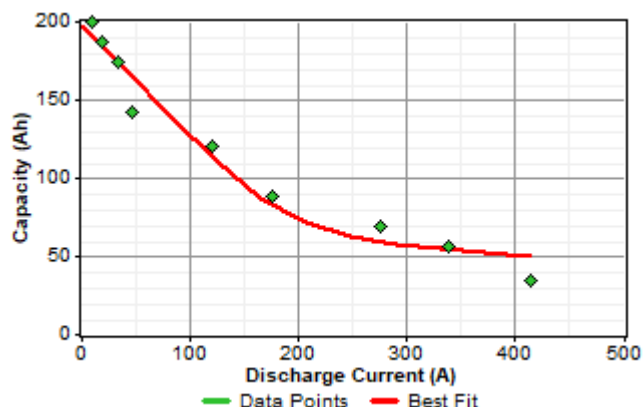


Figura 4.11. Relació entre capacitat i corrent del model de bateria 6FM200D. Extret de la simulació amb HOMER.

Els consums de la microxarxa són en corrent altern, de manera que caldrà incorporar un convertidor ondulador DC/AC per transformar el corrent continu sortint dels mòduls fotovoltaics i de les bateries en corrent altern. A més de l'inversor, també és necessari un rectificador AC/DC per carregar les bateries a partir del generador de suport. Aquests convertidors també serveixen per adaptar els valors de tensió. HOMER agrupa aquests dos convertidors en un sol bloc. A la pràctica, aquest bloc seria un inversor carregador. Segons el preu de mercat d'inversors híbrids d'uns 3 kW, s'ha seleccionat un preu de 3000 € per una potència de 3 kW.

Finalment, s'introdueixen els paràmetres relatius al generador de suport i el combustible que utilitza. D'igual manera que en els altres elements de la microxarxa, la cerca d'informació sobre preus de generadors de suport ha sigut útil per introduir aquests paràmetres. Es considera que un grup electrogen de 2,2 kW (monofàsic) té un cost de 1050 € i un cost de manteniment de 0,1 €/h. («Grupos Electrògenos») Un paràmetre important a definir sobre el generador és el mínim percentatge de càrrega de treball, que, tal com s'ha aplicat amb anterioritat, ha de ser d'un 30 % per evitar errors mecànics. També es defineix que el combustible del generador és dièsel i que el preu d'aquest es situa al voltant dels 1,2 €/l (segons la gràfica del preu del dièsel mostrada a la Figura 3.3).

Com a dades afegides, per a cadascun dels elements comentats anteriorment, es permet fer diversos anàlisis sensitius per a diferents quantitats o valors de potència. Això permet a HOMER buscar el valor òptim per cada element i obtenir el cost net total més adient. També s'aplica la consigna que el percentatge anual d'escassetat o insuficiència de capacitat sigui del 0 %, o el que és el mateix, que es satisfacin els consums de la microxarxa en tot moment.

4.4. Resultats de la simulació amb HOMER

Després d'establir tots els valors i condicions de l'escenari a estudiar, s'inicia la simulació. Després de 4 minuts i 34 segons, s'obtenen els resultats. Aquests consisteixen en diferents casos o escenaris amb diferents combinacions dels recursos triats.





















	PV (kW)	Gen (kW)	6FM200D	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Gen (hrs)
   	2	2.00	4	2	\$ 12,395	1,519	\$ 31,810	0.782	0.67	474	747
   		2.00	2	2	\$ 3,675	2,696	\$ 38,143	0.938	0.00	1,377	2,180
   	6		30	4	\$ 38,800	1,985	\$ 64,171	1.577	1.00		
   	6	3.00		2	\$ 27,432	5,049	\$ 91,981	2.261	0.63	2,584	5,466
   		4.00			\$ 1,909	9,285	\$ 120,600	2.965	0.00	5,535	8,736

Figura 4.12. Resultats de la simulació realitzada amb HOMER.

Tal i com es mostra a la Figura 4.12, l'escenari òptim hi apareix en primer lloc. Com era d'esperar, el seu cost net total és el més reduït d'entre tots els casos, sent de 31810 €. Altres aspectes en que aquest cas també és més favorable que els altres és el cost de l'energia (0,782 €/kWh) i la utilització del *genset*. Donat que l'objectiu d'aquest treball és dissenyar una microxarxa elèctrica amb un grup electrogen com a suport, del qual es minimitzi el seu ús, el primer cas resultant de la simulació és el triat (consum de 474 litres de dièsel i 747 hores de funcionament a l'any). S'observa que si l'objectiu fos una màxima penetració de les energies renovables, l'escenari més favorable seria el tercer, on tota l'energia s'obtingria de la fotovoltaica i de bateries. Això implicaria, però, una quantitat molt elevada de bateries (30), la qual cosa augmentaria molt el cost total de la instal·lació, que seria d'aproximadament el doble que el primer cas comentat.

Tot seguit es procedeix a analitzar amb més detall l'escenari triat.

4.4.1. Anàlisi energètic

Complint amb la idea que es tenia inicialment, l'energia solar fotovoltaica constitueix la font primària d'energia, mentre que el grup electrogen és un sistema de suport. La Taula 4.2 mostra les dades numèriques d'aquest aspecte.

Taula 4.2. Proporció de les fonts productores de la microxarxa. Extret de la simulació amb HOMER.

Producció	kWh/any	%
Generador FV	2932	67

Grup electrogen	1420	33
Total	4352	100

Si es desglossa mes a mes la proporció de producció fotovoltaica i generador dièsel, es comprova que durant els mesos d'estiu, on hi ha més abundància de recurs solar, el grup electrogen treballa a menys potència que els mesos on el recurs solar és escàs (hivern). Aquest fet queda reflectit gràficament a la Figura 4.13.

A l'apartat d'introducció de paràmetres al programa, es va establir que els percentatges de consums no satisfets i d'escassetat o insuficiència de capacitat fossin nuls. No obstant això, segons la , es comprova que la càrrega no satisfeta és de 0,511 kWh/any i l'escassetat d'energia és de 1,80 kWh/any. Igualment, els percentatges que aquestes xifres representen són d'un valor molt proper a zero, de manera que aquesta petita diferència respecte les consignes es pot menysprear.

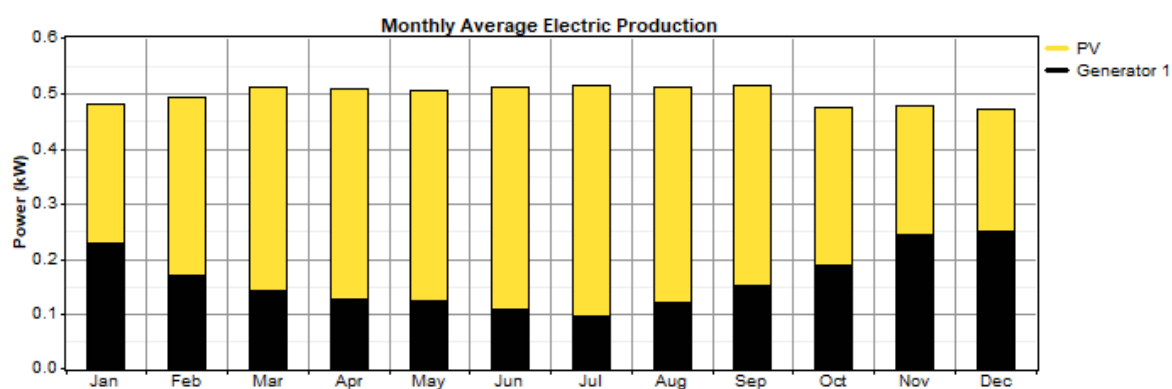


Figura 4.13. Proporció de producció de FV i *genset* mes a mes. Extret de la simulació amb HOMER.

En total, la fracció renovable de la microxarxa és d'un 67,4 %.

Pel que respecta a la fotovoltaica, HOMER considera òptim un valor de 2 kW com a potència nominal. El programa no et permet escollir un model concret de mòdul fotovoltaic, de manera per calcular el nombre de panells, s'hauria de dividir el valor de potència pic entre la potència de cada mòdul triat.

Pel que fa al sistema de bateries, la disposició d'aquestes i les seves característiques principals es recullen a la Taula 4.3. El terme capacitat nominal utilitzable fa referència a l'energia que de fet es pot extreure de la bateria, ja que aquest element es caracteritza per poder-se descarregar amb una profunditat de descàrrega màxima determinada per no baixar d'un estat de càrrega (SoC, *State of Charge*) determinat. El model de bateries escollit té un SoC mínim del 40 %. Això vol dir que només es

pot aprofitar el 60 % de la capacitat nominal de la bateria, amb la qual cosa resulta en 5,76 kWh utilitzables.

Taula 4.3. Dimensionament del sistema d'emmagatzematge. Extret de la simulació amb HOMER.

Terme	Valor
Bateries en sèrie	2
Bateries en paral·lel	2
Total de bateries	4
Tensió del bus (V)	24
Capacitat nominal (kWh)	9,60
Capacitat nominal utilitzable (kWh)	5,76
Autonomia (hores)	15,9

L'evolució de l'estat de càrrega de les bateries en funció del mes de l'any i de l'hora del dia es veu d'una forma clara al DMap (Data Map) de la Figura 4.14. En els períodes de temps amb més radiació solar (hores centrals del dia i mesos de l'estiu i propers), les bateries es troben amb un SoC més elevat ja que hi ha més energia fotovoltaica per carregar-les. Les bateries assoleixen el seu SoC mínim a la matinada; concretament, sobretot els mesos d'hivern, s'arriba a valors propers al SoC més petit permès (40 %) en hores de primera hora del matí o del final de la matinada (4h, 5h, 6h, 7h i 8h). Això és degut a que des d'última hora del dia anterior, les bateries han estat suplint la demanda. Tot i que aquesta demanda és força reduïda durant la nit, les bateries es descarreguen durant moltes hores seguides i el seu estat de càrrega disminueix significativament.

És important destacar que la llegenda de la Figura 4.14 pren valors d'entre 35 % i 105 % de l'estat de càrrega de la bateria. Es desconeix l'aplicació de rangs de SoC amb extrems tan inversemblant per a una bateria, però es pot afirmar amb seguretat que les bateries escollides no poden sobrepassar ni sobrepassen els límits d'estat de càrrega mínim i màxim.

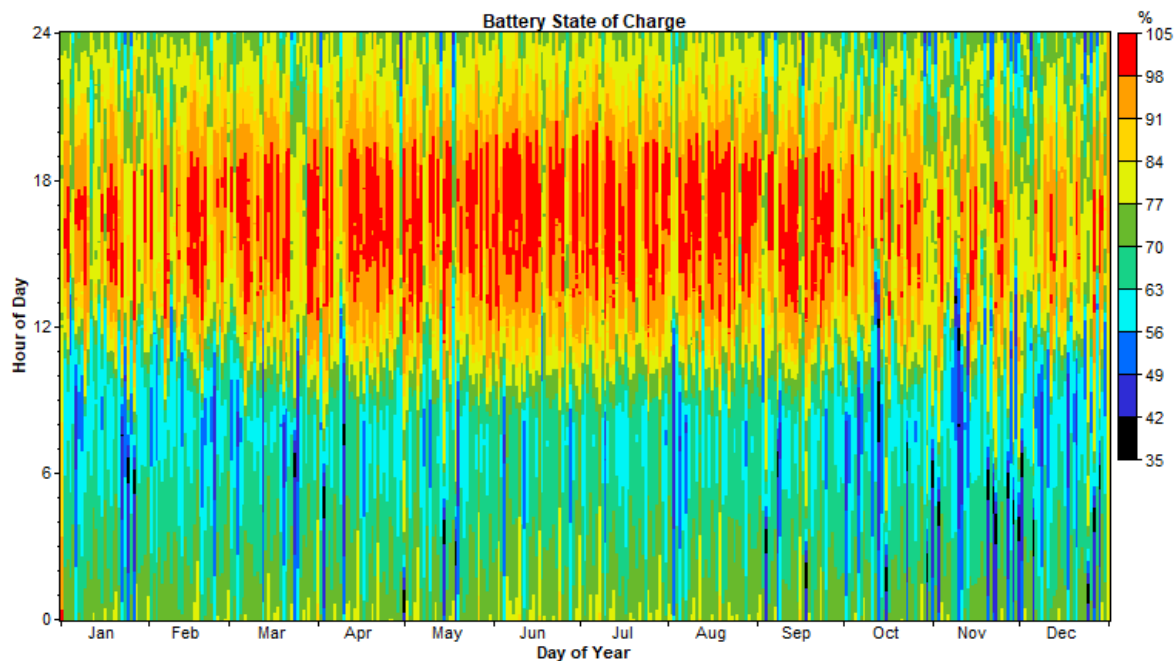


Figura 4.14. SoC de les bateries mes a mes i segons les hores del dia. Extret de la simulació amb HOMER.

El convertidor dimensionat té una potència de 2 kW. Ja que el programa HOMER engloba l'inversor i el rectificador en un mateix bloc, els resultats de la simulació et proporcionen la capacitat o potència nominal a la sortida DC del rectificador i a la sortida AC de l'ondulador, la qual en ambdós casos és de 2 kW.

Finalment, un dels elements més rellevants a l'hora d'analitzar-lo, degut a l'objectiu del treball de minimitzar el seu ús, és el generador dièsel. La Taula 4.4 recull els aspectes més importants d'aquest element de la microxarxa.

Taula 4.4. Dimensionament del sistema de suport (*genset*). Extret de la simulació amb HOMER

Terme	Valor
Hores d'operació (h/any)	747
Nombre d'engegades (engegades/any)	1969
Consum de combustible (l/any)	474
Consum específic de combustible (l/kWh)	0,334

És de destacar que el *genset* treballa a potència nominal la major part del temps. Aquest fet queda reflectit clarament al DMap Figura 4.15. Es comprova que els períodes de temps, tant pel que fa a mesos i a hores del dia, on el *genset* pot treballar a menys potència (zones marcades amb colors més clars, diferents del vermell) són a les hores centrals del dia i els mesos de l'estiu i propers a l'estiu, ja que el recurs solar és més elevat i l'energia solar fotovoltaica pot suplir més part de la demanda.

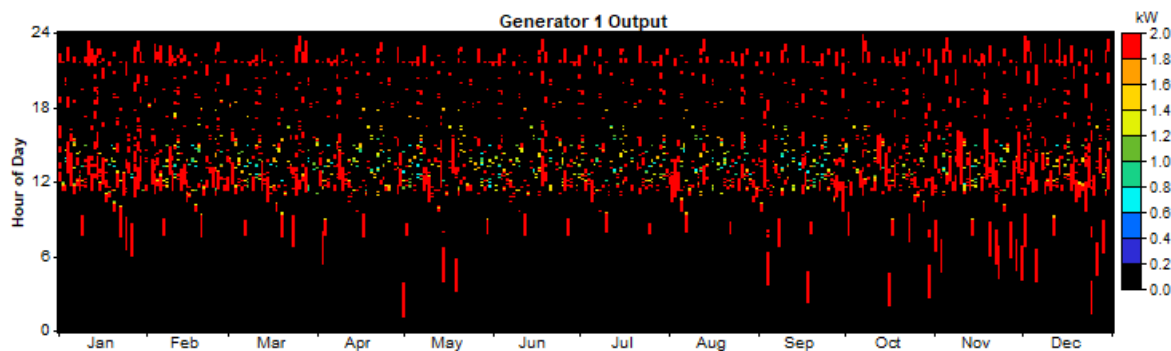


Figura 4.15. Freqüència de les potències a les que treballa el *genset* durant l'any. Extret de la simulació amb HOMER.

Per finalitzar, es mostra l'evolució del consum de l'habitatge, de la producció solar fotovoltaica i de la producció del *genset* al llarg d'un dia típic, en concret el dia 8 de juny. L'evolució d'aquestes variables es mostra a la Figura 4.16. Al tractar-se d'un dia i un mes de primavera-estiu, la radiació solar, i per consegüent la producció fotovoltaica, és força elevada. Els consums de la microxarxa segueixen el perfil de càrrega típic en l'àmbit domèstic, tenint els pics de demanda a les hores centrals del dia (d'11h-12h a 14h-15h). El consum torna a augmentar a la nit (21h-23h), tot i que no en la mateixa mesura que els consums del migdia. Donat que existeixen tres pics de demanda molt marcats en el perfil de càrrega observat, el *genset* s'activa més d'una vegada durant el dia. La funció del grup electrogen es suplir part de la càrrega, ja que la fotovoltaica, tot i ser elevada, resulta insuficient. A la mateixa vegada, el generador dièsel carrega les bateries, per tal que aquestes puguin satisfer la demanda de les hores del dia que la producció solar és nul·la o molt pobre. A la part inferior de la figura, també es mostra l'evolució de l'estat de càrrega de les bateries.

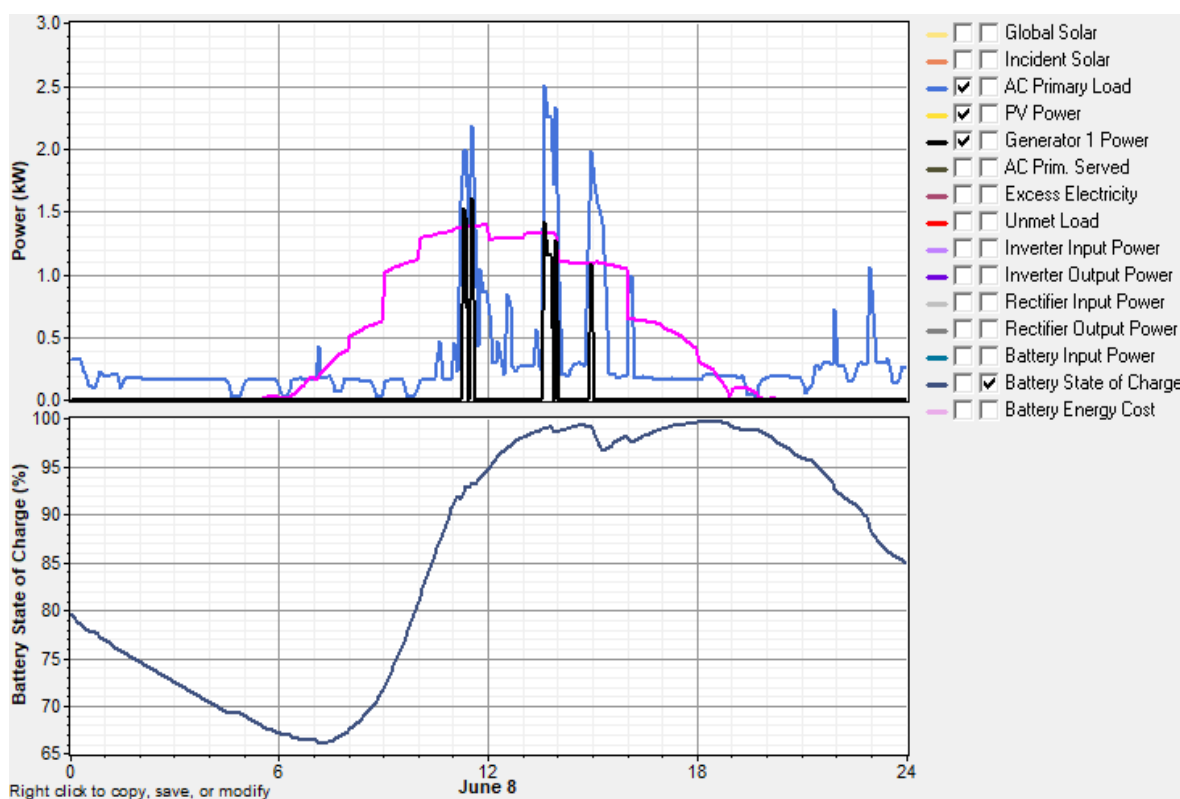


Figura 4.16. Evolució dels consums, FV, *genset* i SoC el dia 8 de juny. Extret de la simulació amb HOMER.

Per comprovar més clarament els moments de càrrega i descàrrega de les bateries, a la Figura 4.17 s'afegeix una variable més al gràfic de la Figura 4.16. Es verifica que, efectivament, les bateries són carregades en els moments en que la generació fotovoltaica supera els consums, però també quan el generador dièsel es connecta per suplir el dèficit d'energia.

És interessant comentar que, en aquest dia escollit, el *genset* es posa en marxa quatre vegades durant el dia, amb una durada màxima d'operació d'una hora. Els moments del dia en que el generador treballa a més potència i durant més temps coincideix amb els pics de demanda de l'habitatge estudiat, ja que ni el recurs solar ni l'energia de les bateries és suficient per satisfer aquests pics.

Observant novament la Figura 4.16, es comprova que en el dia escollit es té un petit excés d'energia entre les 15h i les 17h, ja que la generació fotovoltaica supera els consums i les bateries es troben carregades pràcticament al 100%. Degut al fet que la instal·lació és aïllada de la xarxa de subministrament i la injecció de qualsevol energia sobrant no és possible, la solució per no malbaratar aquesta quantitat d'energia és exigir a l'inversor solar que no treballi en el punt de màxima potència. Aquesta mesura permetria ajustar més les corbes de consum i generació fotovoltaica, evitant una sobreproducció energètica innecessària.

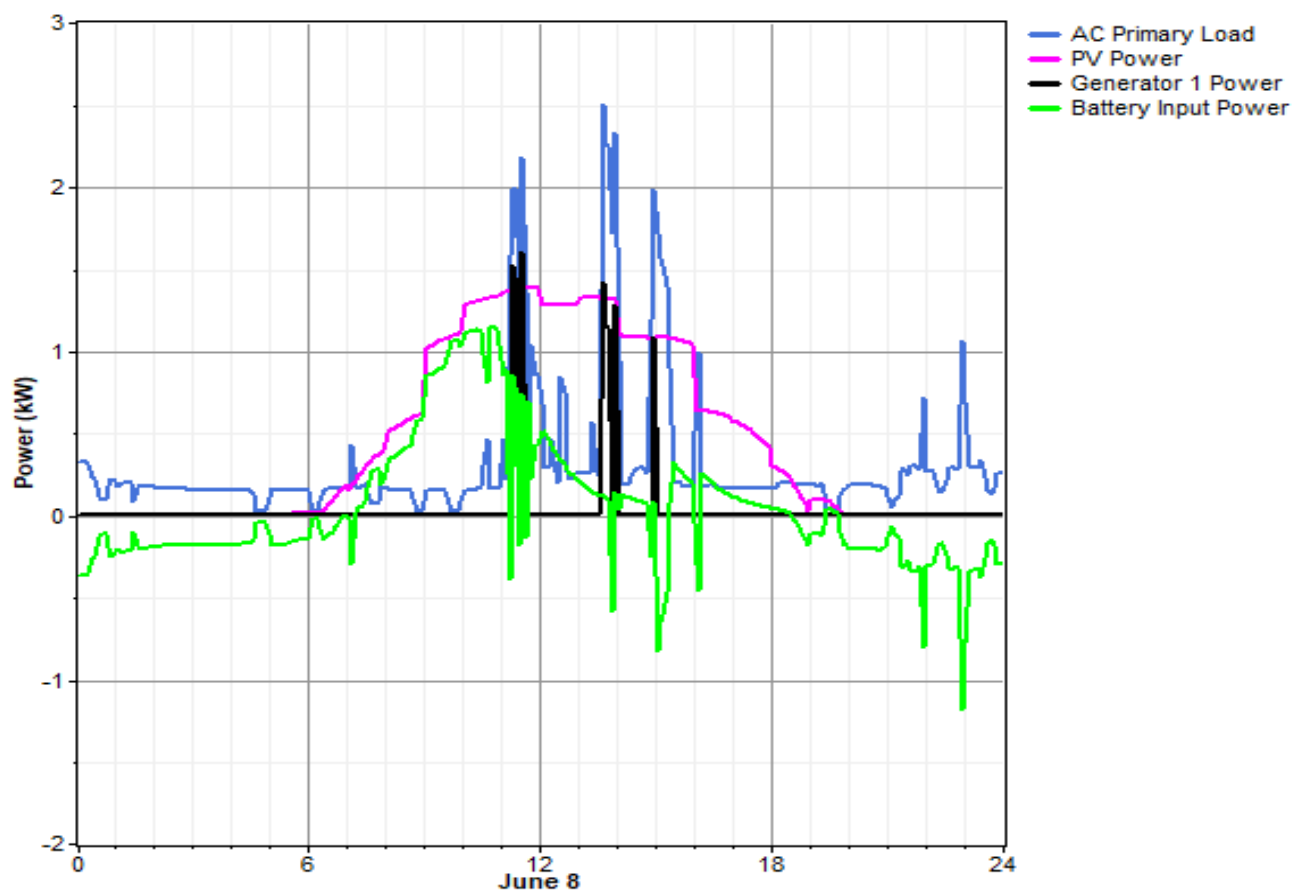


Figura 4.17. Evolució dels consums, FV, *genset* i entrada de la bateria el dia 8 de juny. Extret de la simulació amb HOMER.

4.4.2. Anàlisi econòmic

HOMER també permet realitzar un anàlisi econòmic del sistema energètic dimensionat. A continuació se'n donen els detalls més rellevants.

El primer aspecte a comentar és el resum del flux d'efectiu, flux de fons, flux de tresoreria o flux monetari (*cash flow*). Aquest és un terme que fa referència al flux de diners d'entrada i de sortida, generat per un projecte d'inversió, en un període determinat. Altrament, es pot entendre com la diferència entre cobraments i pagaments. La gràfica de la Figura 4.18 representa el flux d'efectiu per cada component de la microxarxa.

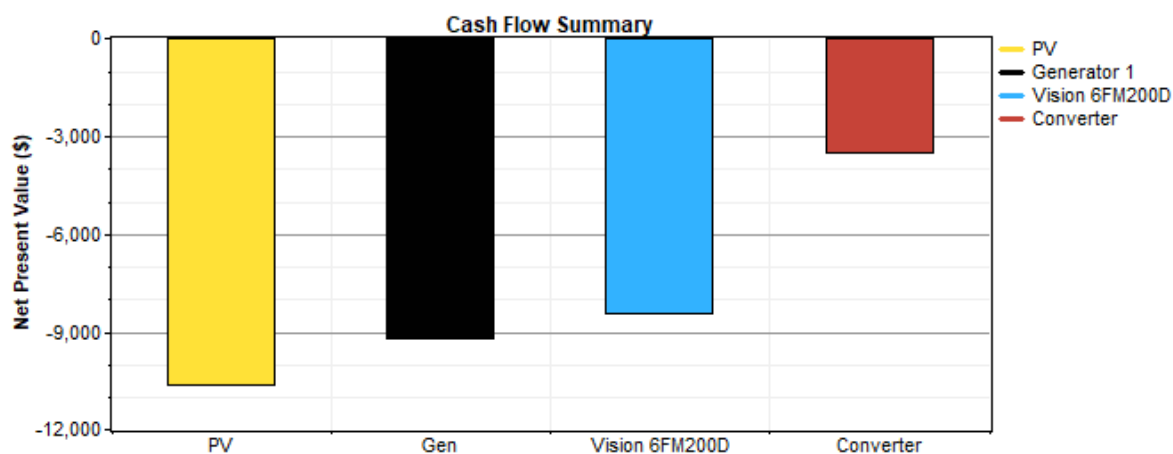


Figura 4.18. Resum del flux d'efectiu per cada component de la instal·lació. Extret de la simulació amb HOMER.

La Taula 4.5 recull dades numèriques del resum del *cash flow* per cada component, desglossant els diferents costos. El NPC o VAN total obtingut té un valor de 31810 €. Un dels termes econòmics que apareix en l'anàlisi del *cash flow* és el valor residual o *salvage value*. “El valor residual és el valor final d'un actiu després de la seva depreciació i amortització, és a dir, al final de la seva vida útil. El valor residual serà relativament alt si l'actiu en qüestió pot ser venut o reutilitzat (com per exemple, un edifici) i serà molt baix o nul si l'actiu no pot aprofitar-se de cap manera (com per exemple, una màquina antiga que ha quedat obsoleta ja que hi ha nous models al mercat).” («KeyAndCloud»)

Taula 4.5. Cash flow per cada element de la microxarxa i del sistema total. Extret de la simulació amb HOMER.

Component	Inversió (€)	Reemplaçament (€)	Operació i manteniment (€)	Combustible (€)	Valor residual (€)	Total (€)
FV	-8000	-2079	-1704	0	1165	-10618
Grup electrògen	-955	-296	-868	-7278	168	-9229
Bateries	-1440	-6082	-1023	0	114	-8431
Convertidor	-2000	-835	-852	0	155	-3531
Sistema	-12395	-9291	-4447	-7278	1602	-31810

Els mòduls fotovoltaics són els elements de la microxarxa amb una vida útil més elevada (20 anys), de manera que el seu valor residual també és el major. En canvi, les bateries tenen una vida útil força

reduïda, la qual cosa comporta que el seu valor residual sigui força reduït. En conjunt, el valor residual del sistema és de 1602 €, fent que el valor actual net sigui de 31810 €.

Altres valors a destacar del sistema són el cost anivellat de l'electricitat (*Levelized Cost of Electricity*, COE), també conegut com Levelized Energy Cost o cost anivellat de l'energia, que té un valor de 0,782 €/kWh, i el cost d'operació o funcionament, que és de 1519 € per any.

La Figura 4.19 mostra la representació gràfica del *cash flow* any a any per cada component durant un període de 25 anys. Aquesta representació permet identificar d'una forma més clara els anys en que els diferents components de la instal·lació han de ser substituïts, apart de la resta de costos anuals.

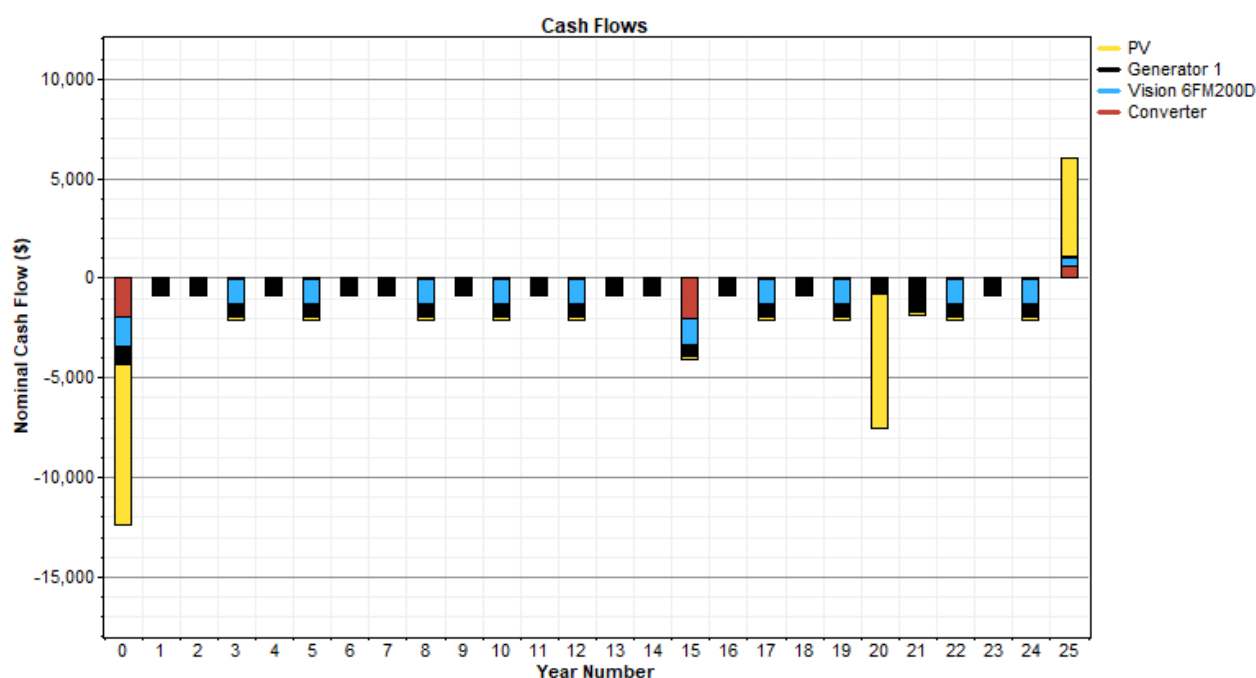


Figura 4.19. *Cash flow* any a any per cada component de la instal·lació. Extret de la simulació amb HOMER.

Per finalitzar l'estudi econòmic de la microxarxa dissenyada, es compara l'escenari estudiat amb l'escenari més desfavorable. L'escenari més desfavorable en termes de valor actual net, de cost de l'energia, de consum de combustible i de fracció de renovables és aquell en que l'única font energètica és el generador dièsel. En aquest escenari desfavorable, el *genset* escollit té una potència nominal de 4 kW. Si bé és cert que la inversió inicial és més reduïda que en l'escenari escollit, els costos anuals són molt superiors degut a diversos motius. Ja que el generador constitueix l'única font d'energia, les hores de treball d'aquest són moltes, comportant un esgotament primerenc de la seva vida útil. Aquest fet dóna lloc a una necessitat de reemplaçament molt freqüent, amb el consegüent cost econòmic. A més, l'ús de combustible també és molt elevat, la qual cosa augmenta en gran quantitat les despeses econòmiques anuals. La gran qualitat de desfavorable de l'escenari amb

només un grup electrogen comporta que, al comparar-lo amb l'escenari estudiat, els beneficis són molt notables. Aquests beneficis es recullen a la Taula 4.6.

Taula 4.6. Comparació de l'escenari actual amb el és desfavorable. Extret de la simulació amb HOMER.

Terme	Valor
Estalvi total (€)	88791
Estalvi anual (€/any)	6946
TIR (%)	75,1
Període de retorn o <i>payback</i> (anys)	1,8

La Figura 4.20 mostra gràficament la comparació feta entre l'escenari estudiat i l'escenari més desfavorable basat únicament en un *genset*.

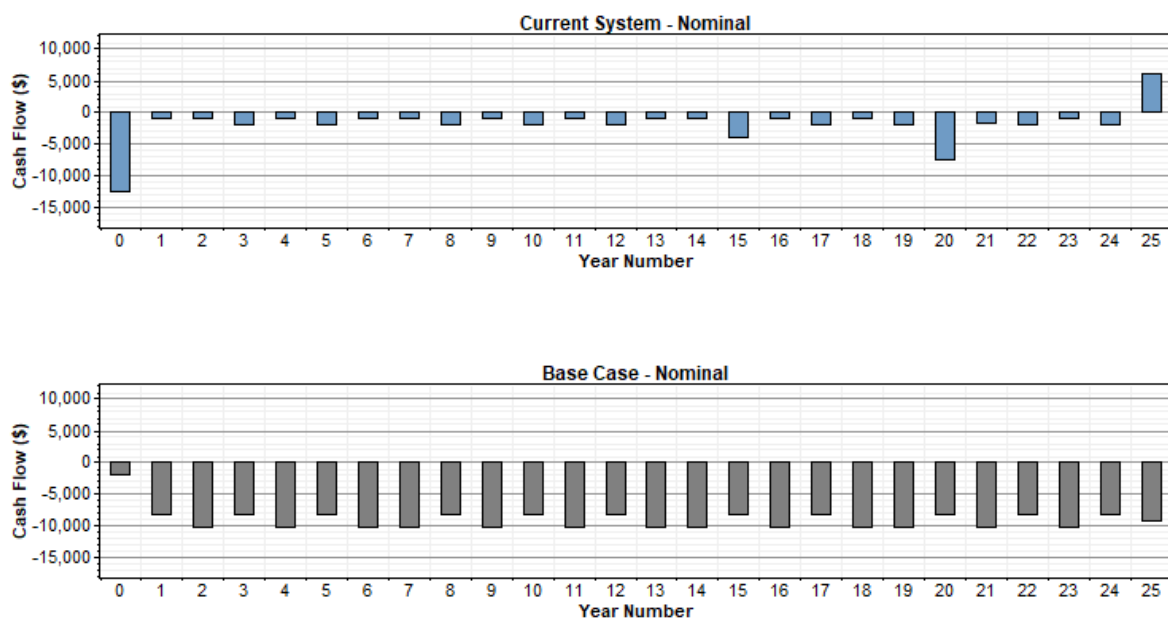


Figura 4.20. Comparació del cash flow entre l'escenari actual i l'escenari desfavorable. Extret de la simulació amb HOMER.

5. Assaig de l'escenari

Després d'haver analitzat i dimensionat l'escenari concret de la microxarxa elèctrica d'estudi, es procedeix a verificar aquest escenari de forma pràctica, que és un dels objectius més rellevants d'aquest projecte. L'assaig de l'escenari s'ha dut a terme al laboratori d'Energia Elèctrica, Electrònica de Potència, Automatització i Control de Sistemes (E3PACS) de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

5.1. Equipament emprat

En aquest apartat s'enumeren i s'expliquen breument els diferents equipaments emprats del laboratori E3PACS que configuren la microxarxa estudiada.

EMULADOR DE GRUP ELECTROGEN

El model del controlador és IntelliLite NT AMF 25, de la firma ComAp. («ComAp») Les sigles AMF fan referència a *Automatic Mains Failure*, també conegut com *Automatic Transfer Switch* o ATS, i s'encarrega de fer el canvi o la transició al generador de potència d'emergència en cas d'una gran pèrdua de potència de la xarxa o apagada total. No disposar d'un mòdul AMF implicaria operar manualment el generador, amb el consegüent risc de pèrdua de dades, de dany potencial a l'equipament elèctric i grans quantitats d'interrupcions. La Figura 5.1 mostra l'aspecte del panell o consola del controlador.



Figura 5.1. Panell del controlador IntelliLite AMF 25. Fotografia de l'autor.

L'InteliLite AMF 25 consisteix en un controlador compacte de grup electrogen per aplicacions d'un sol *genset* en mode *standby* o mode de potència principal. Compta amb un registre detallat d'esdeveniments i rendiment amb temps i data.

El controlador té la capacitat d'incorporar-li diversos mòduls d'extensió. En el cas del controlador del laboratori E3PACS, el mòdul d'extensió incorporat és el CM-Ethernet, també anomenat IB-Lite. Aquest mòdul consta d'una interfície *Ethernet* de 10/100 Mbit en connector RJ45, permet la monitorització i la regulació o ajustament del controlador, permet el control remot mitjançant IP o AirGate des d'un software específic de ComAp i possibilita la integració del controlador en un Building Management System (BMS) o el control remot a través dels protocols MODBUS/TCP i SNMP.

El *software* o programari per excel·lència dedicat a la monitorització i control del controlador és LiteEdit, el qual es distribueix per l'empresa ComAp. El controlador també compta amb excel·lents funcions de comunicació remota, les quals seran utilitzades en aquest treball. La pantalla de control del *software* de LiteEdit presenta l'aspecte mostrar a la Figura 5.2.

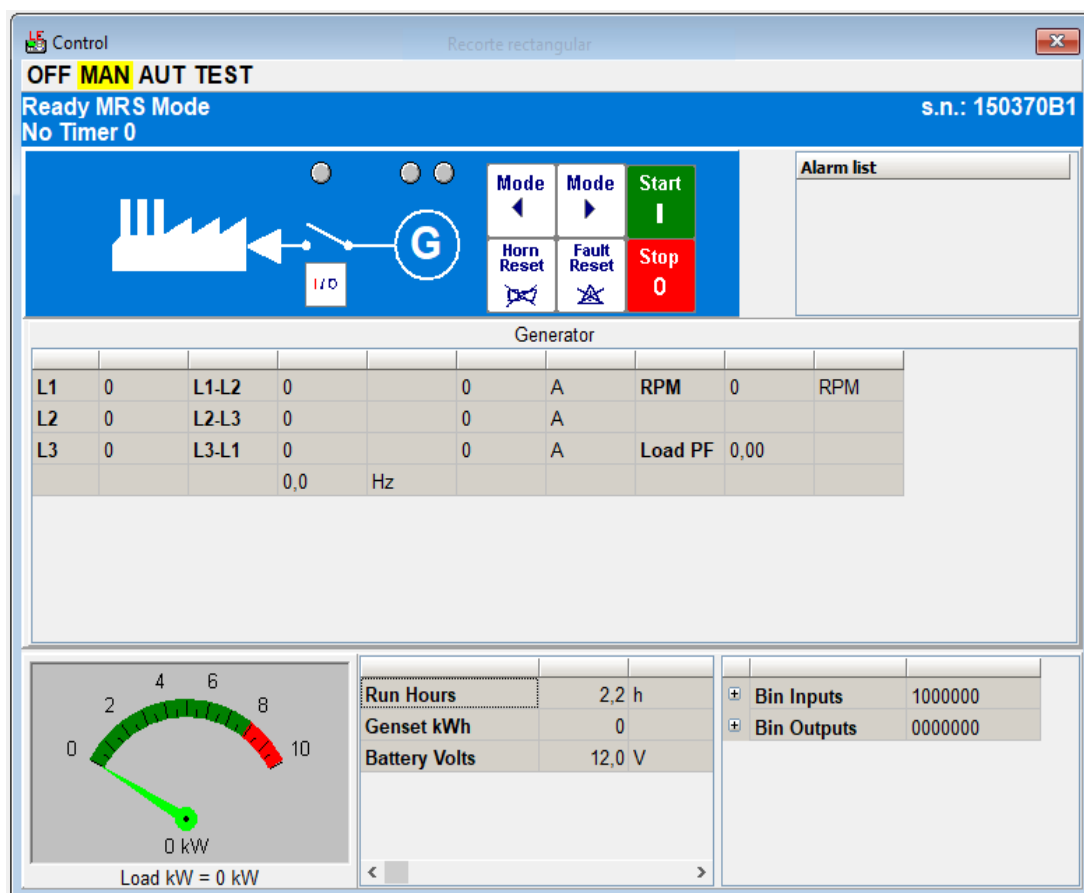
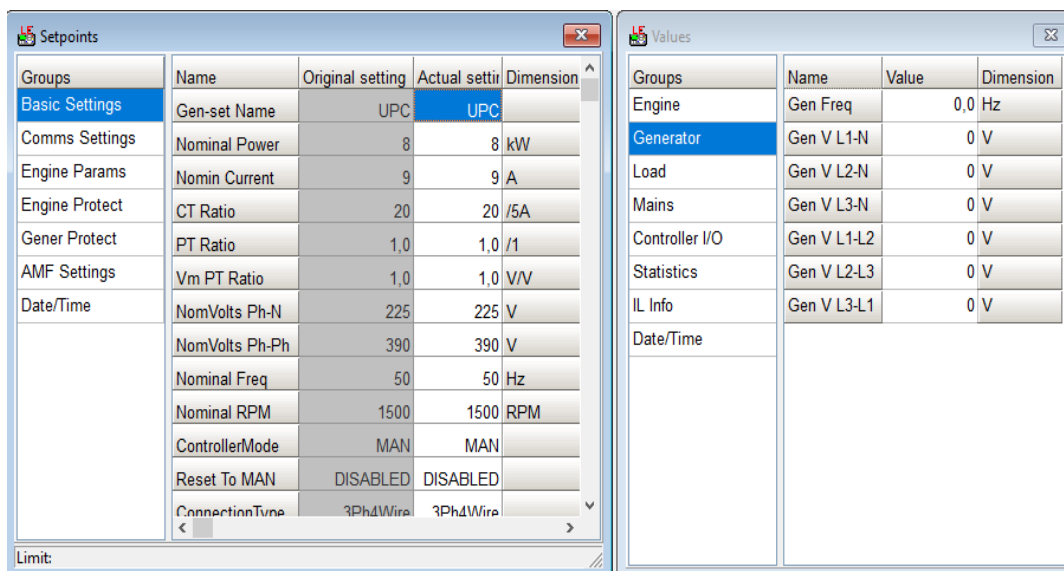


Figura 5.2. Finestra de control del software LiteEdit per controlar i monitoritzar l'InteliLite AMF 25.

A més, aquest programa consta de dues finestres importants dedicades al control i la monitorització. Aquestes finestres es mostren a la Figura 5.3. La finestra de *Setpoints* t'indica el valor dels diferents punts de treball del controlador i et permet modificar-los i establir la configuració desitjada, en funció de l'aplicació i del generador al qual està connectat. La finestra de valors compleix únicament la funció de monitorització.



The image shows two side-by-side windows from the Intelilite AMF 25 software. The 'Setpoints' window on the left contains a table with columns: Groups, Name, Original setting, Actual setting, and Dimension. The 'Values' window on the right contains a table with columns: Groups, Name, Value, and Dimension.

Groups	Name	Original setting	Actual setting	Dimension
Basic Settings	Gen-set Name	UPC	UPC	
Comms Settings	Nominal Power	8	8 kW	
	Nomin Current	9	9 A	
Engine Params	CT Ratio	20	20 /5A	
Engine Protect	PT Ratio	1,0	1,0 /1	
Gener Protect	Vm PT Ratio	1,0	1,0 V/V	
AMF Settings	NomVolts Ph-N	225	225 V	
Date/Time	NomVolts Ph-Ph	390	390 V	
	Nominal Freq	50	50 Hz	
	Nominal RPM	1500	1500 RPM	
	ControllerMode	MAN	MAN	
	Reset To MAN	DISABLED	DISABLED	
	ConnectionType	3Ph4Wire	3Ph4Wire	

Groups	Name	Value	Dimension
Engine	Gen Freq	0,0 Hz	
Generator	Gen V L1-N	0 V	
Load	Gen V L2-N	0 V	
Mains	Gen V L3-N	0 V	
Controller I/O	Gen V L1-L2	0 V	
Statistics	Gen V L2-L3	0 V	
IL Info	Gen V L3-L1	0 V	
Date/Time			

Figura 5.3. Finestra dels *setpoints* i valors de l'Intelilite AMF 25.

Els dos tipus d'aplicacions en que es pot utilitzar aquest controlador són AMF (Automatic Mains Failure Start) i MRS (Manual Remote Start). Aquest darrer tipus és el cas d'aquest projecte, on no es contempla la connexió a xarxa; el generador només connecta a la càrrega (a través de l'inversor solar, no directament). Una visió de conjunt d'aquest tipus d'aplicació és mostrat a l'esquema de la Figura 5.4.

Donat que l'objectiu és interconnectar els diversos elements que formen la microxarxa, s'ha treballat en les comunicacions del controlador a través d'un llenguatge de programació. Ja que es disposa del mòdul CM-Ethernet, s'ha emprat el protocol MODBUS/TCP per comunicar-se amb el controlador del *genset* amb LabVIEW. El protocol de comunicacions MODBUS a través de connexió Ethernet (MODBUS/TCP) i, en general el protocol MODBUS, es basa en l'enviament de consultes i respostes entre un equip mestre i un altre esclau. Aquesta comanda consisteix en una concatenació de *bytes* que indiquen l'adreça del controlador amb el que es vol comunicar-se, la funció a realitzar (03 – llegir múltiples registres, 06 – escriure registre simple, 16 – escriure múltiples registres), el registre al qual es vol accedir, el nombre de registres, les dades que es volen escriure (si s'escau) i un codi d'error per comprovar la comunicació entre mestre i esclau.

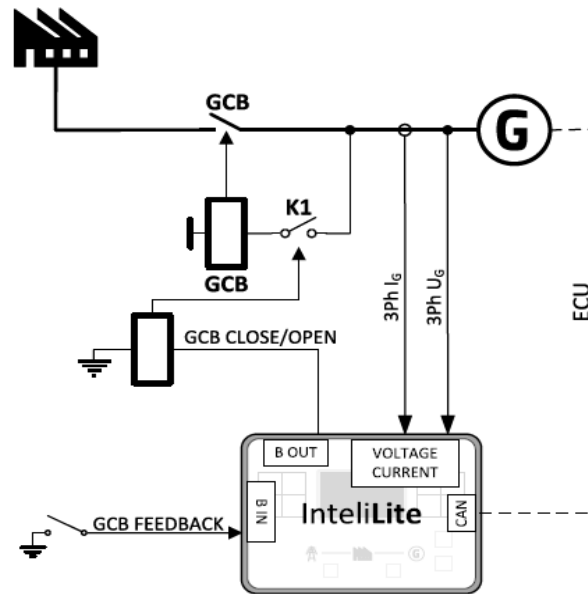


Figura 5.4. Visió de conjunt de l'aplicació MRS. («Global Guide Intelilite AMF 25»)

El cicle consulta-resposta (*query-response*) que es produeix entre el mestre i l'esclau es representa a la Figura 5.5.

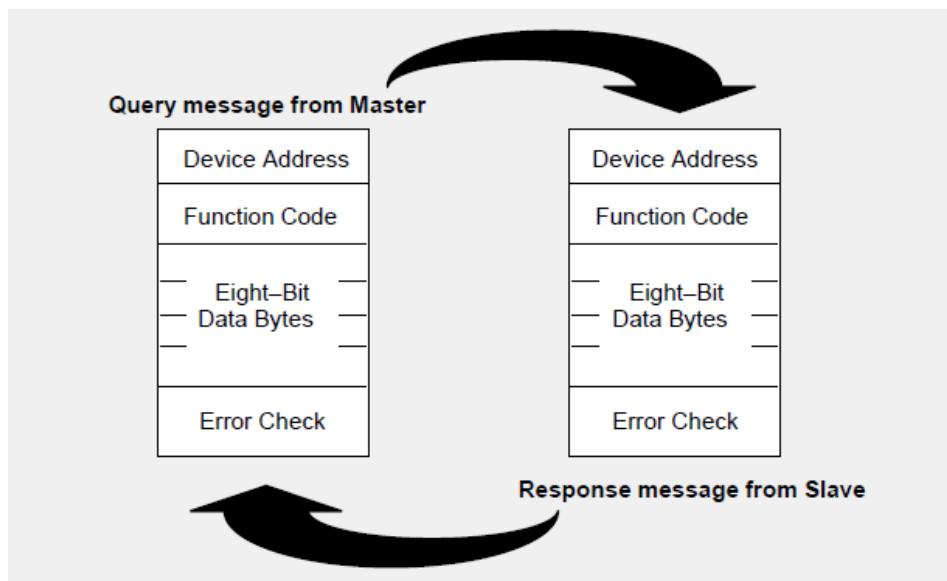


Figura 5.5. Cicle mestre-esclau consulta-resposta. (MODICON Inc. 1996)

- **Consulta.** El codi de funció en la consulta indica a l'esclau amb el que comunicar-se el tipus d'acció a realitzar. Com ja s'ha dit, s'inclou la funció a realitzar, l'adreça del registre (en quin registre ha de començar) i quants registres s'han de llegir o escriure. El camp de comprovació

d'error o *error check* ofereix un mètode per l'esclau per validar la integritat o validesa del contingut dels missatges.

- **Resposta.** Si la resposta de l'esclau és normal, el codi de funció en la resposta és un ressò del codi de funció de la consulta. Els *bytes* de la resposta contenen les dades preses per l'esclau, com valors de registres o estats. Si es produeix un error, el codi de funció és modificat per indicar que la resposta és una resposta errònia, i els *bytes* de resposta contenen un codi que descriu l'error. El camp de comprovació d'error permet al mestre confirmar que el contingut del missatge és vàlid.

La llista dels diferents registres del controlador Intelilite AMF 25 als que es poden accedir es pot exportar del programa LiteEdit, mentre hi ha establerta una connexió entre el programa i el controlador. La Figura 5.6 mostra una part d'aquesta llista a mode d'exemple.

Register(s)	Com.Obj.	Name	Dim	Type	Len	Dec	Min	Max	Group
40001	8192	Gen V L1-N	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40002	8193	Gen V L2-N	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40003	8194	Gen V L3-N	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40005	9628	Gen V L1-L2	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40006	9629	Gen V L2-L3	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40007	9630	Gen V L3-L1	V	Unsigned	2	0	-	-	Generator
40008	8198	Load A L1	A	Unsigned	2	0	-	-	Load
40009	8199	Load A L2	A	Unsigned	2	0	-	-	Load
40010	8200	Load A L3	A	Unsigned	2	0	-	-	Load
40011	8209	RPM	RPM	Unsigned	2	0	-	-	Engine
40012	8210	Gen Freq	Hz	Unsigned	2	1	-	-	Generator
40014	8202	Load kW	kW	Integer	2	0	-	-	Load
40015	8524	Load kW L1	kW	Integer	2	0	-	-	Load
40016	8525	Load kW L2	kW	Integer	2	0	-	-	Load
40017	8526	Load kW L3	kW	Integer	2	0	-	-	Load
40018	9018	Nominal kVA	kVA	Integer	2	0	-	-	Invisible
40019	8203	Load kVAr	kVAr	Integer	2	0	-	-	Load
40020	8527	Load kVAr L1	kVAr	Integer	2	0	-	-	Load
40021	8528	Load kVAr L2	kVAr	Integer	2	0	-	-	Load
40022	8529	Load kVAr L3	kVAr	Integer	2	0	-	-	Load
40023	8204	Load PF		Integer	1	2	-	-	Load
40024	8533	Load PF L1		Integer	1	2	-	-	Load

Figura 5.6. Part del llistat de registres de l'Intelilite AMF 25 extret del programa LiteEdit.

La Figura 5.7 mostra un exemple del cicle consulta-resposta entre el mestre i l'esclau. En aquest exemple, es pretén llegir el voltatge de la petita bateria de la que disposa el controlador Intelilite AMF 25. Per tant, cal utilitzar la funció 03 (llegir registres), especificar quina és l'adreça del registre (en funció del llistat de registres comentat anteriorment), el nombre de registres (1, en aquest cas). Ja que el primer registre disponible és 40001, l'adreça del registre es calcula restant aquesta quantitat al número de registre que es vol llegir o escriure.

Battery voltage – reading (read multiple registers)

Request: 01 03 00 32 00 01 25 5C

01 = Controller address

– see your controller settings

03 = Modbus function code (Read Multiple Registers)

00 32 = Register address: Register number (Ubat => 40051 for IL-NT) (Ubat => 40058 for IC-NT)

– 40051 - 40001 = 50 DEC => 0032 HEX

– see your [Cfg Image](#) or [list of dedicated communication objects](#)

A part of Cfg Image (Modbus Register ...)

Register(s)	Com.Obj.	Name	Dim	Type	Len	Dec	Min	Max	Group
40051	8213	Battery Volts	V	Integer	2	1	-	-	Controller
40052	10124	(N/A)							
40053	10603	D+	V	Integer	2	1	-	-	Controller
40054	8227	Oil Pressure	Bar	Integer	2	1	-	-	Controller
40055	8228	Engine Temp	°C	Integer	2	0	-	-	Controller
40056	8229	Fuel Level	%	Integer	2	0	-	-	Controller
40057	8978	IOM AIL	u4	Integer	2	0	-	-	Extension

00 01 = Number of registers

– 40013, it is one register = 01 DEC => 0001 HEX

– you have to calculate number of register which you want read

5C 25 = CRC

–CRC has to be written LSB then MSB ! See how to calculate [CRC](#) or implementation in C language – page 57.

Response: 01 03 02 00 DC B9 DD

01 = Controller address

– see your controller settings

03 = Modbus function code (Read Multiple Registers)

02 = Length of read data in Bytes (in HEX)

– 02 HEX => 2 DEC

– define the length of data

00 DC = Value of battery voltage

– DC HEX => 220 DEC => Batt. voltage is represented with 1 decimal => 22,0 VDC

– convert the data from hex to dec. Use the multiplication factor (In this case 0.1) !

DD B9 = CRC

– check with your CRC, because of data validity

Figura 5.7. Exemple de consulta-resposta per llegir el voltatge de la bateria del controlador. (ComAp 2009)

L'enviament de les consultes s'ha realitzat amb LabVIEW. LabVIEW és un *software* d'enginyeria dissenyat per aplicacions que requereixen proves, mesures i control amb accés ràpid a informació de dades i *hardware*. És distribuït per la firma National Instruments. Les consultes més importants que haurà d'enviar el mestre (l'ordinador des d'on s'executi el programa de LabVIEW) seran les corresponents a encendre i apagar el motor i activar o desactivar l'interruptor de càrrega. A més es realitzaran mesures de diverses magnituds, les quals s'exportaran i seran tractades amb la resta de dades extretes dels altres elements de la microxarxa. A mode d'exemple, la Figura 5.8 mostra una petita part del programa desenvolupat amb LabVIEW per llegir i escriure registres i comunicar-se amb el controlador IntelliLite AMF 25. Els blocs *Write Single Register* i *Write Multiple Registers* que apareixen a la imatge han sigut extrets d'una llibreria específica de MODBUS, descarregada a través de la pàgina web de National Instruments. (National Instruments) Les dades numèriques entrades a aquests blocs corresponen als registres corresponents. Pel que fa a la comanda d'encendre o apagar el motor (bloc de la dreta de la Figura 5.8), les dades a enviar no figuren a la llista de registres comentada anteriorment, sinó que s'obtenen directament del manual de comunicacions dels controladors IntelliLite NT. La Figura

5.9 recull l'argument i la comanda (no és número de registre com en els casos anteriorment vistos) que cal introduir per dur a terme les funcions d'encendre i pagar el motor. Tornant a la Figura 5.8, el bloc que apareix a l'esquerra de la imatge és el corresponent a canviar el mode de funcionament del controlador a manual (MAN), en comptes d'apagat (OFF). Això és necessari perquè en cas de no fer-ho, el motor no podria ser encès tot i enviar la consulta que pertoca.

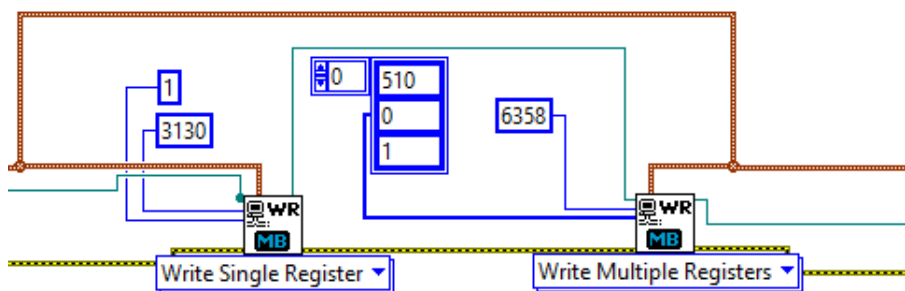


Figura 5.8. Consulta des de LabVIEW per canviar a mode manual i encendre el motor.

Commands

Command (*)	Meaning	Argument (*)	Return value (*)	
1	Engine start	01FE0000	00001FF	OK
			2	Argument has not been written
	Engine stop	02FD0000	00002FE	OK
			2	Argument has not been written
	Horn reset	04FB0000	00004FC	OK
	Fault reset	08F70000	00008F8	OK
2	ECU Fault reset	10EF0000	000010F0	OK
		other	1	Wrong argument
	Close generator circuit breaker	11EF0000	000011F0	OK
			2	Argument has not been written
	Open generator circuit breaker	11F00000	000011F1	OK
			2	Argument has not been written
	Close/open mains circuit breaker	12ED0000	000012EE	OK
			2	Argument has not been written

Figura 5.9. Arguments i comandes a enviar a l'esclau per controlar el motor i l'interruptor de càrrega. Es marquen en groc les comandes i arguments emprats en aquest treball (ComAp 2009)

Pel que fa a les lectures de les magnituds físiques que es volen mesurar, els blocs a emprar en LabVIEW serien els mateixos, però canviant a l'opció *Read Holding Registers* i introduint-hi les consultes pertinents. Als annexos d'aquest treball s'inclou el programa complet desenvolupat amb LabVIEW.

Com a aspecte a destacar, cal dir que per tal que el mestre pugui enviar la consulta correctament al controlador, és necessari introduir unes dades inicials (en aquest cas, des del panel frontal) a un bloc

que inicia la connexió, tal com s'observa a la . Aquestes dades són l'adreça IP del controlador, el número del port de comunicacions (per defecte, sol ser 502) i els paràmetres corresponents al *MBAP Header* (*Modbus Application Header*).

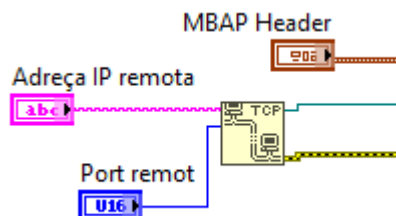


Figura 5.10. Paràmetres inicials per iniciar les comunicacions amb el controlador mitjançant el protocol MODBUS/TCP.

L'accés a les comunicacions del controlador de *genset* IntelliLite AMF 25 no va ser trivial. Després de recopilar informació sobre els protocols de comunicacions que el controlador suporta i endinsant-se més concretament en el protocol MODBUS/TCP, es va procedir a realitzar el programa de LabVIEW que s'ha comentat. Tanmateix, aleshores no era possible establir comunicació amb el controlador degut al sorgiment de diversos errors. Es va identificar que l'error es trobava en el procés d'establir la connexió amb el bloc posterior al bloc TCP.

Per intentar trobar una solució al problema, es va optar per l'ús d'un analitzador de protocols, concretament l'analitzador Wireshark, per veure clarament quin era la comanda que enviava el mestre i quina resposta donava l'esclau. Es va comprovar que les dades enviades del mestre a l'esclau eren les mostrades a la Figura 5.11.

```
> Frame 1: 68 bytes on wire (544 bits), 68 bytes captured (544 bits)
> Ethernet II, Src: AsustekC_ba:32:10 (70:8b:cd:ba:32:10), Dst: ComapSRO_00:3f:92 (68:69:f2:00:3f:92)
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.5.51.211, Dst: 10.5.51.186
> Transmission Control Protocol, Src Port: 52857, Dst Port: 502, Seq: 1, Ack: 1, Len: 14
▼ Modbus/TCP
  Transaction Identifier: 17
  Protocol Identifier: 0
  Length: 8
  Unit Identifier: 1
> Modbus
```

Figura 5.11. Identificació de la comanda enviada del mestre a l'esclau (el controlador). Extret de Wireshark.

Gràcies a aquesta informació, es va esbrinar que els paràmetres que s'estaven introduint incorrectament al programa LabVIEW eren el *Transaction Identifier* (17) i el *Protocol Identifier* (0), dels quals no se'n donaven detalls al manual de comunicacions del IntelliLite AMF 25.

CÀRREGA ELECTRÒNICA

El model de càrregues electròniques és 3B108-108, de la firma Adaptive Power Systems. La càrrega electrònica de la sèrie APS 3B està dissenyada per provar, avaluar i emmagatzemar fonts d'alimentació AC o DC i bateries. La càrrega electrònica APS 3B Sèries es pot operar des del panell frontal (mode manual) o mitjançant el control remot RS232 o GPIB. L'aspecte d'aquestes càrregues es pot veure a la Figura 5.12.



Figura 5.12. Càrregues electròniques programables AC o DC, Serie 3B. Fotografia de l'autor.

Els contorns de potència constant de la corba VI del model 3B108-108 és la mostrada a la Figura 5.13.

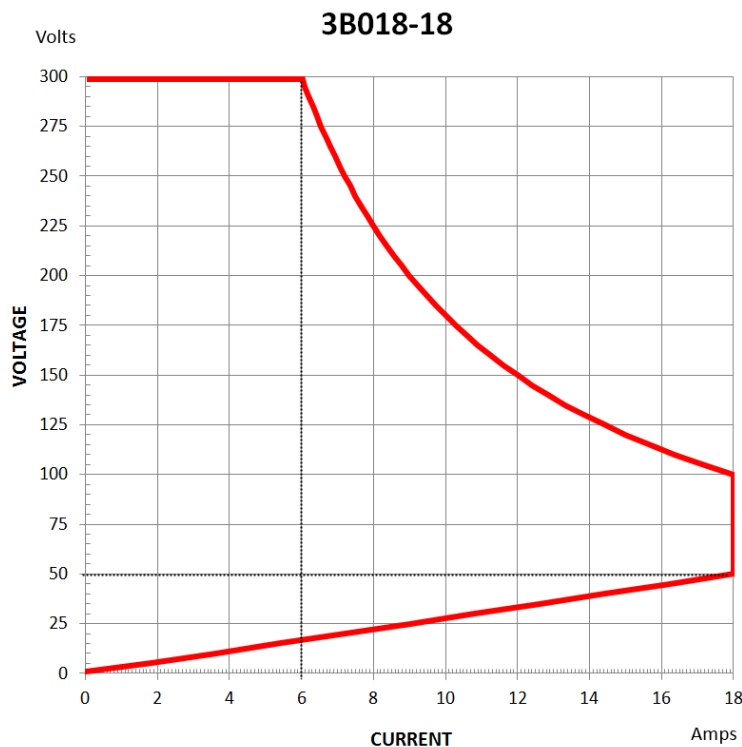


Figura 5.13. Corba VI del model 3B108-108. (Adaptive Power Systems 2014)

Per tots els models de les càrregues electròniques d'APS (Adaptive Power Systems), existeixen tres modes de funcionament:

- **Constant Current Mode (CC).** Es tracta del mode d'operació utilitzat més freqüentment a l'hora de provar una font de tensió com una font d'alimentació AC, alimentació en DC o bateries. En aquest mode de funcionament, la càrrega assolirà un nivell constant de corrent segons el que estableixi l'usuari, independentment de les variacions de tensió. Un circuit de realimentació en temps real assegura un corrent estable sota qualsevol variació de la tensió de la font de CA, subministrament de CC o bateria.

Aquest mode es recomana per a proves de regulació de càrrega, proves d'estabilitat de bucles, proves de descàrrega de bateries i qualsevol altra forma de proves de regulació de voltatge. És el mode emprat en la realització de l'assaig d'aquest treball.

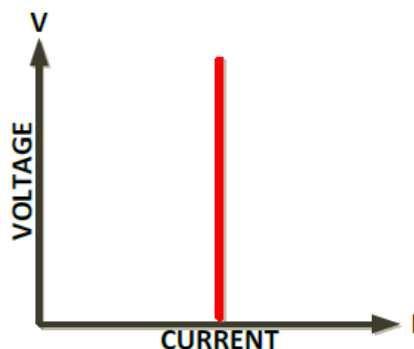


Figura 5.14. Mode de funcionament Corrent Constant. (Adaptive Power Systems 2014)

- Linear Constant Current Mode (LIN).** Quan es treballa en mode de corrent constant lineal, l'entrada de corrent de càrrega a la càrrega de la sèrie 3B depèn de la configuració de corrent, independentment de la tensió d'entrada, per exemple, el nivell de corrent eficaç o RMS no es modifica. El corrent de càrrega seguirà la forma d'ona de la tensió d'entrada en temps real. El mode LIN s'implementa a través d'un circuit de control d'augment automàtic d'ample de banda (ACG) i el senyal de control de corrent de sortida ACG rastrejarà la tensió d'entrada. El circuit AGC produeix un senyal de sortida d'amplitud constant sempre que l'amplitud del senyal d'entrada superi una tensió de referència ajustable aplicada al detector de pic. Es pot canviar la tensió de referència per canviar el rang de tensió d'entrada resultant en una sortida d'amplada constant.

El circuit AGC respon gairebé instantàniament per ajustar-se a un augment sobtat de la tensió d'entrada. Aquesta resposta ràpida de transició ràpida fa que el mode LIN sigui especialment adequat per a entrades de tensió AC no sinusoidals, com ara la forma d'ona de pas, la forma d'ona quadrada i qualsevol voltatge d'entrada de CA amb una forma d'ona molt distorsionada.

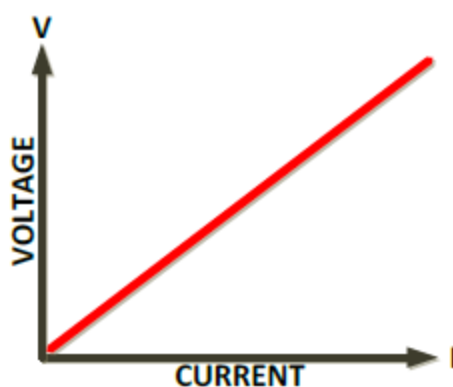


Figura 5.15. Mode de funcionament Corrent Constant Lineal. (Adaptive Power Systems 2014)

- **Constant Resistance Mode (CR).** En el mode de resistència constant, la càrrega descendirà el corrent de forma directament proporcional a la tensió d'entrada sensada. La relació entre tensió i corrent és lineal segons la llei d'Ohm i pot ser establerta per l'usuari dins del rang operatiu de la càrrega AC i DC. El corrent queda definit per la relació matemàtica de la llei d'Ohm, sent la resistència i la tensió valors definits per l'usuari.
El mode CR és útil per a les proves de descàrrega de bateries dels sistemes de bateries que s'utilitzen per alimentar càrregues d'impedància constant, ja que la tensió disminuirà a mesura que la bateria es descarrega amb el temps resultant en un decreixement reduït del corrent.

Algunes característiques clau dels models de la sèrie 3B són: (Adaptive Power Systems 2014)

- Càrrega electrònica de CA i CC totalment programable amb configuració flexible i capacitats de doble rang.
- Control totalment remot de totes les configuracions de càrrega i mesurament *read back*.
- Mesuradors duals de tensió i corrent d'alta precisió i alta resolució.
- Suport d'un rang de freqüència de CC o de 0,1 Hz a 400 Hz (modes CC i LIN).
- Control del factor de potència (PF) i del factor de cresta (CF) (modes CC i LIN).
- Detecció o sensat interna o externa de tensió.
- Prova automàtica Go / NoGo.
- Protecció completa per sobrepotència, sobretemperatura, sobretensió i polaritat inversa.
- Sortida del monitor de corrent analògica (I-Monitor).
- Entrada de sincronització externa.
- Control de ventilador de velocitat variable per a un funcionament silencios.

De la mateixa manera que en el cas de l'emulador de grup electrogen, s'ha utilitzat un programa de LabVIEW per controlar remotament la càrrega. En aquest cas, però, es parteix d'un programa de LabVIEW donat pel fabricant. Les interfícies de control remot que suporta la sèrie 3B són les interfícies RS232 i GPIB. En aquest projecte s'empra la interfície *GPIB Ethernet*. L'objectiu d'aquest programa és introduir una sèrie de valors de corrent a la càrrega. Aquests valors de corrent corresponen als consums de la microxarxa estudiada, obtinguts a partir de la potència activa demandada i suposant una tensió constant de 230 V. A la mateixa vegada, també és interessant monitoritzar les variables de corrent, tensió i potència activa mesurades per la càrrega, per tal de comparar aquestes mesures amb les realitzades per altres elements de la microxarxa. El codi del programa de LabVIEW es presenta als annexos del treball, juntament amb el programa corresponent a l'emulador de *genset*.

INVERSOR/CARREGADOR SOLAR

El model d'inversor/carregador emprat és el MKS 5000, de la firma Axpert. Es tracta d'un inversor equipat amb un controlador de càrrega solar MPPT per maximitzar i regular l'alimentació de corrent

continu de la matriu solar per carregar el banc de bateries. El disseny sense transformador proporciona una conversió d'energia fiable en una mida compacta. La seva intuïtiva pantalla LCD ofereix una operació configurable per l'usuari i de fàcil accés mitjançant botons, com ara el control de càrrega de les bateries, prioritat de càrrega de la font d'alterna o de solar i entrada acceptable de tensió basada en diferents aplicacions. La Figura 5.16 mostra l'aspecte d'aquest inversor.



Figura 5.16. Inversor/carregador MKS 5kW-48 Axpert. («Merkasol»)

Les principals característiques d'aquest model d'inversor carregador són:

- Inversor d'ona sinusoïdal pura.
- Factor de potència de sortida unitari.
- Funció d'equalització de la bateria incorporada per ampliar el cicle de vida les bateries i optimitzar el rendiment.
- Controlador de càrrega solar MPPT incorporat.
- Rang de tensions d'entrada seleccionable per electrodomèstics i computadores personals.
- Corrent de càrrega seleccionable basada en aplicacions.
- Compatible amb la tensió de xarxa o la potència del generador.
- Funcionament en paral·lel de fins a 9 unitats.

Aquest inversor és l'ideal per l'escenari d'aquest projecte, ja que la seva aplicació bàsica és en sistemes energètics híbrids. La Figura 5.17 representa l'arquitectura bàsica del sistema típic d'aplicació de l'inversor Axpert.

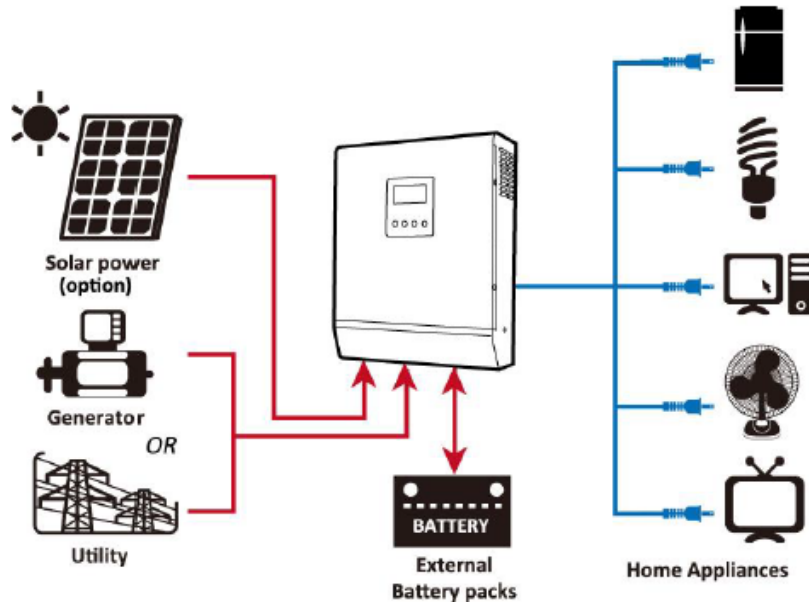


Figura 5.17. Arquitectura bàsica d'aplicació de l'inversor Axpert. («1 kVA-5 kVA INVERTER/CHARGER» 2008)

Aquest inversor constitueix l'element de la microxarxa que interconnecta la resta d'equips. Té un gran poder de decisió, ja que permet connectar o desconectar alguns elements en funció de condicions externes i consignes aplicades per l'usuari. En el cas que ocupa aquest projecte, l'inversor és utilitzat per exportar les dades que mesura durant la realització de l'assaig de l'escenari estudiat.

Es requereix l'ús del programari WatchPower, que és un *software* de monitorització d'inversors que pot monitoritzar múltiples dispositius a través de port sèrie al mateix temps. Les funcions principals del programari de monitorització de WatchPower inclouen registre de dades per a dispositius, missatges d'alarma, missatges d'error i configuració de paràmetres per als dispositius. Mitjançant aquest programa, s'han extret els valors de diferents variables durant el temps de durada de l'assaig. El temps mínim d'exportació de dades amb WatchPower és de 30 segons, mentre que el temps mínim de visualització de dades al programa és d'1 segon. Aquestes dades han sigut comparades amb les extreïtes de l'emulador de *genset* i de la càrrega electrònica. Un cop s'han organitzat totes les dades, s'han realitzat diverses representacions gràfiques que faciliten la interpretació de les mateixes. L'aspecte de la pantalla principal del programa WatchPower es presenta a la [Figura 5.17] .

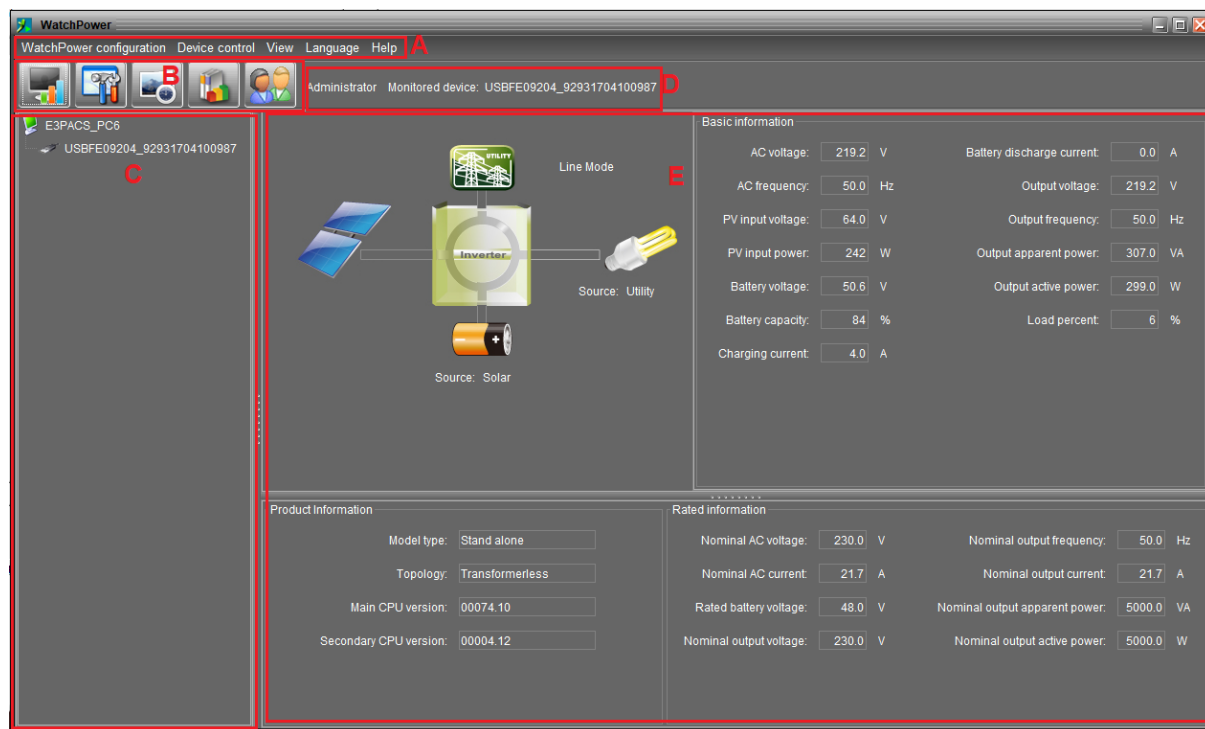


Figura 5.18. Finestra principal del programa WatchPower. Elaboració pròpia.

- A. **Menú de funcions.** Ofereix un conjunt d'eines complet per navegar i ajustar la Interfície Gràfica d'Usuari (GUI).
- B. **Menú de dreceres.** Proporciona dreceres per les funcions més comunes.
- C. **Navegació de l'inversor.** Indica tots els dispositius.
- D. **Informació actual de monitorització.** Exposar el nom de l'usuari i la identificació de l'inversor monitoritzat.
- E. **Finestra principal.** Mostra el flux de potència, informació de funcionament, informació del dispositiu i informació nominal de l'inversor monitoritzat.

És interessant destacar que en les primeres proves que es van realitzar connectant a l'inversor l'emulador de *genset*, es va produir una sobretensió a l'inversor. Per aquest motiu, es va incorporar un transformador a la sortida de l'emulador de *genset* per tal d'absorbir possibles sobretensions al connectar-lo a la microxarxa. Aquest fet condiciona l'automatització del sistema i de l'assaig, ja que és necessari activar o desactivar manualment l'interruptor magnetotèmic del transformador quan es desitgi fer la connexió del generador a la microxarxa.

CAMP FOTOLTAIC

L'inversor descrit anteriorment té connectat un conjunt de mòduls fotovoltaics situats al terrat de l'Escola d'Enginyeria Est. També es disposa d'una estació meteorològica d'on poder extreure dades d'irradiància, entre d'altres.

El model de mòduls instal·lats és el A320-M, de la firma ATERSA. Es tracta d'un mòdul fotovoltaic monocristal·lí que, per la seva relació pes/potència, és el més emprat en instal·lacions d'alt rendiment sota qualsevol nivell d'irradiació. Amb els inversors carregadors amb MPPT, aquests mòduls són una bona elecció tant per instal·lacions d'injecció a xarxa com per instal·lacions aïllades. És una placa solar amb 72 cèl·lules de silici d'alt rendiment, encapsulada amb materials d'alta qualitat per oferir al client tranquil·litat i rendiment excel·lents des del primer dia d'ús. Una imatge del mòdul es pot veure a la Figura 5.19.



Figura 5.19. Mòdul fotovoltaic A320-M ATERSA. (ATERSA)

Aquest model de mòdul fotovoltaic es caracteritza per ser un dels més potents del mercat en l'actualitat. Les seves característiques tècniques més destacades es presenten a la Taula 5.1.

Taula 5.1. Característiques més importants del mòdul A320-M ATERSA. (ATERSA)

Terme	Valor
Potència nominal (W)	320
Eficiència del mòdul (%)	16,45
Corrent en el punt de màxima potència (A)	8,52
Tensió en el punt de màxima potència (V)	37,56
Àrea (m ²)	1,92

La disposició dels mòduls fotovoltaics a la terrassa de l'Escola es mostra a la Figura 5.20.

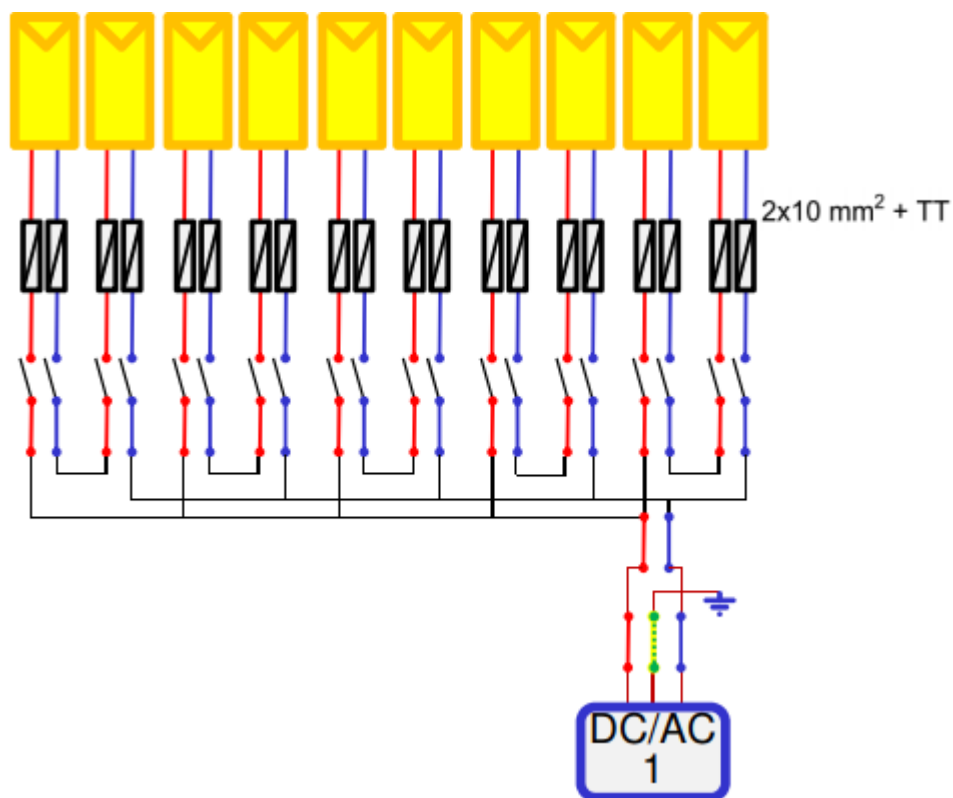


Figura 5.20. Disposició dels mòduls fotovoltaics a la terrassa de la EEBE. (Francisco Casellas)

BATERIES

El laboratori E3PACS també disposa d'una sèrie de bateries, les quals estan connectades a l'inversor Axpert. El model concret de bateries és SB 6/330 A Sonnenschein SOLAR BLOCK, de la firma GNB Industrial Power.

Les bateries Sonnenschein SOLAR BLOCK formen una gamma molt potent i segura per aplicacions en condicions dures. Aquesta gamma és la font d'energia ideal per instal·lacions fotovoltaïques industrials mitjanes, segones residències, centrals d'energia eòlica, així com per altres equips de seguretat de subministraments elèctrics. L'aspecte d'aquestes bateries es mostra a la Figura 5.21.

Els avantatges principals d'aquestes bateries són:

- Excel·lent rendiment de cicles. 1200 cicles a 60 % de profunditat de descàrrega C_{10} (a 20°C).
- *Dryfit Gel*. Tecnologia VRLA (*Valve-regulated Lead-Acid Battery*).

- Menor consum d'energia. Estalvi de costos.
- Disseny resistent. Sòlid fins i tot en condicions extremes.
- A prova de descàrrega profunda. Major subministrament d'energia a llarg termini.
- Completament reciclable. Menor emissió de CO₂.



Figura 5.21. Bateria Sonnenschein SOLAR BLOCK. («Natural Technology Systems»)

5.2. Simulacions prèvies

L'objectiu inicial del treball era fer un assaig de la microxarxa estudiada interconnectant els diferents equips i programant-los per tal que s'activessin o desactivessin en funció d'una sèrie de consignes introduïdes. Tanmateix, no ha sigut possible accedir a les comunicacions de l'inversor Axpert, impossibilitant aquest objectiu inicial.

L'alternativa a aquest inconvenient consisteix en activar manualment alguns d'aquests elements de la microxarxa. Per fer-ho, s'han de realitzar una sèrie de càlculs per determinar quan s'hauria d'activar el grup electrogen, per exemple.

Al no poder comunicar l'inversor amb el programa que controla el *genset*, aquest no pot engegar-se o apagar-se en funció de la irradiància rebuda en els mòduls fotovoltaics o de l'estat de càrrega de les

bateries. Les dades d'irradiància s'extreuen, doncs, del servidor web (Ammonit) de l'estació meteorològica instal·lada a la terrassa de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est. Les dades d'irradiància es poden exportar amb un interval de temps mínim d'1 segon. Degut al fet a que les dades de consum de la microxarxa es divideixen en intervals de 5 minuts, caldrà adaptar les dades d'irradiància, tractant-les en aquest cas amb el programa MATLAB.

El primer pas és descarregar les dades d'irradiància solar de l'estació meteorològica de l'Escola., situada a les següents coordenades: 41°24'50.2"N 2°13'19.6"E. Després d'analitzar el recurs solar de diferents dies d'abril i maig, s'ha determinat que el dia 7 de maig de 2018 correspon a un dia típic desfavorable en relació a la irradiància solar. S'escull aquest dia com a dia tipus per a realitzar l'assaig ja que la presència de diversos moments del dia on la radiació solar és reduïda comporta una gran descàrrega de les bateries i força l'activació del grup electrogen. Es disposa de les dades cada segon del dia 7 de maig en un full de càlcul, però, com s'ha dit, cal adaptar-les a una base de temps dividida en períodes de 5 minuts, per igualar-les a les dades de càrrega. Per dur a terme aquesta adaptació, s'empra el software MATLAB, ja que permet tractar grans quantitats de dades de forma més fàcil que Microsoft Excel.

En un *script* de MATLAB es crea un bucle iteratiu *For* per tal que es llegeixin les dades del vector d'irradiància prèviament creat cada 300 segons (equivalent a 5 minuts) i faci la mitjana aritmètica de cada interval. El vector irradiància del que es parteix s'obté simplement llegint totes les dades d'irradiància del dia des del fitxer Excel. S'obtenen així 288 intervals de dades, igualant el nombre d'intervals de dades de consum (el període de temps analitzat és d'un dia). El codi d'aquest bucle iteratiu es mostra a la Figura 5.22.

```
i=[];
in=1;
f=300;
for n=1:288 %Vull un vector de 288 valors (períodes de 5 minuts)
    mitjana=mean(irradiancia(in:f));
    i(n)=mitjana;
    n=n+1;
    in=f+1;
    f=f+300;
end
```

Figura 5.22. Bucle iteratiu que agrupa les dades d'irradiància en intervals de 5 minuts. Elaboració pròpia.

Amb el mateix *script* també es realitza una representació gràfica del perfil d'irradiància rebut el dia 7 de maig de 2018. Aquest perfil es pot veure a la Figura 5.23. En aquest moment, els consums i la irradiància solar tenen la mateixa base de temps, la qual cosa permet representar ambdues corbes al mateix gràfic. La representació gràfica de la Figura 5.23 mostra clarament que es tracta d'un dia desfavorable pel que fa a la irradiància rebuda. Aquesta condició de desfavorable es fa encara més evident si es compara amb

un perfil d'irradiància d'un dia amb molt recurs solar, com per exemple el 2 de maig de 2018, representat a la Figura 5.24.

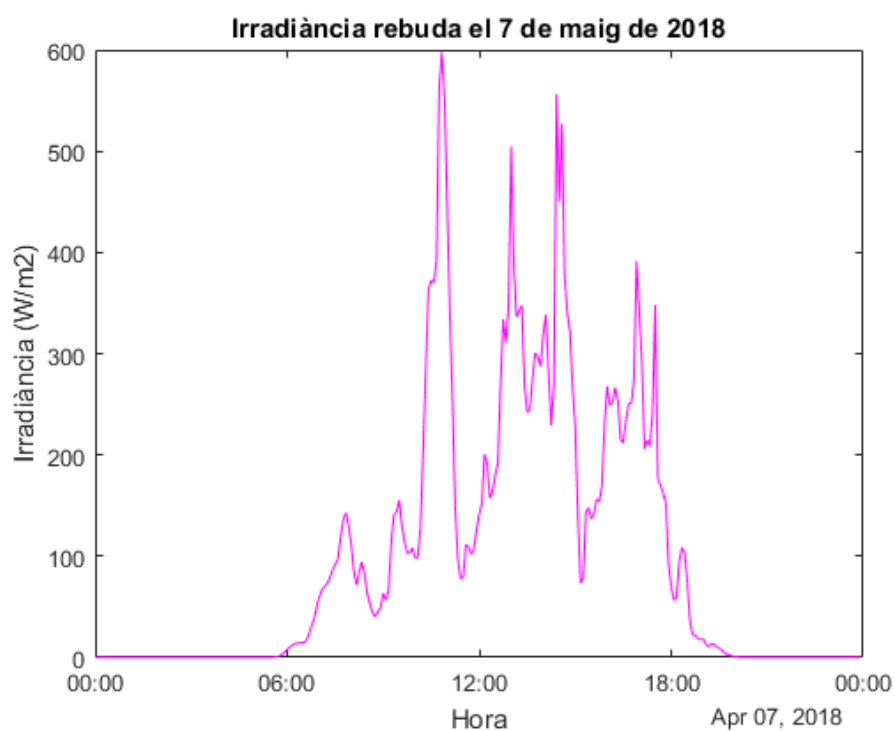


Figura 5.23. Irradiància rebuda el dia 7 de maig de 2018 a l'EEBE. Elaboració pròpia.

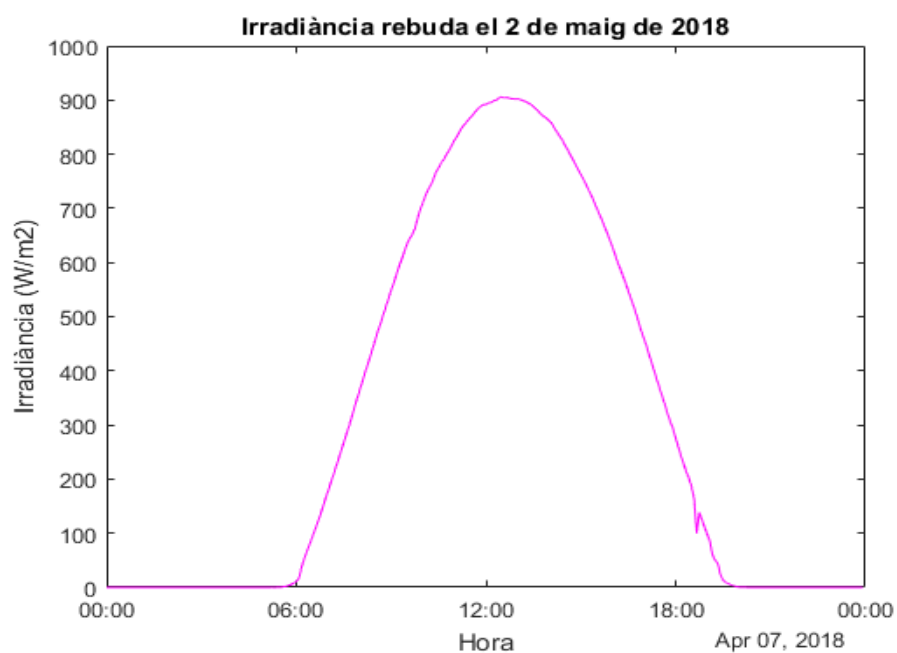


Figura 5.24. Irradiància rebuda el dia 2 de maig de 2018 a l'EEBE. Elaboració pròpia.

Com a dia tipus pels consums de la microxarxa, s'ha escollit el dia 7 d'abril de 2018, ja que la corba de consum segueix el perfil típic domèstic sense assolir pics de demanda massa elevats ni massa reduïts. Ja que les dates escollides com a dies tipus per a la irradiància i els consums són força properes i formen part de la mateixa estació de l'any (primavera), es considera que els resultats de l'anàlisi pot ser força fiable. Es representen, doncs, ambdós perfils, el de generació fotovoltaica i el de consum, a la mateixa gràfica, tal i com es veu a la Figura 5.25.

El càlcul de la producció fotovoltaica s'ha realitzat a partir de les dades d'irradiància i de les característiques del mòdul fotovoltaic utilitzat al laboratori. Partint de la potència fotovoltaica màxima de l'escenari estudiat, determinada pel dimensionament amb HOMER, s'ha calculat el nombre de mòduls A320-M necessaris i quina és la seva producció al llarg d'un dia. Tot seguit, la Taula 5.2 mostra els valors emprats en la obtenció de la producció fotovoltaica.

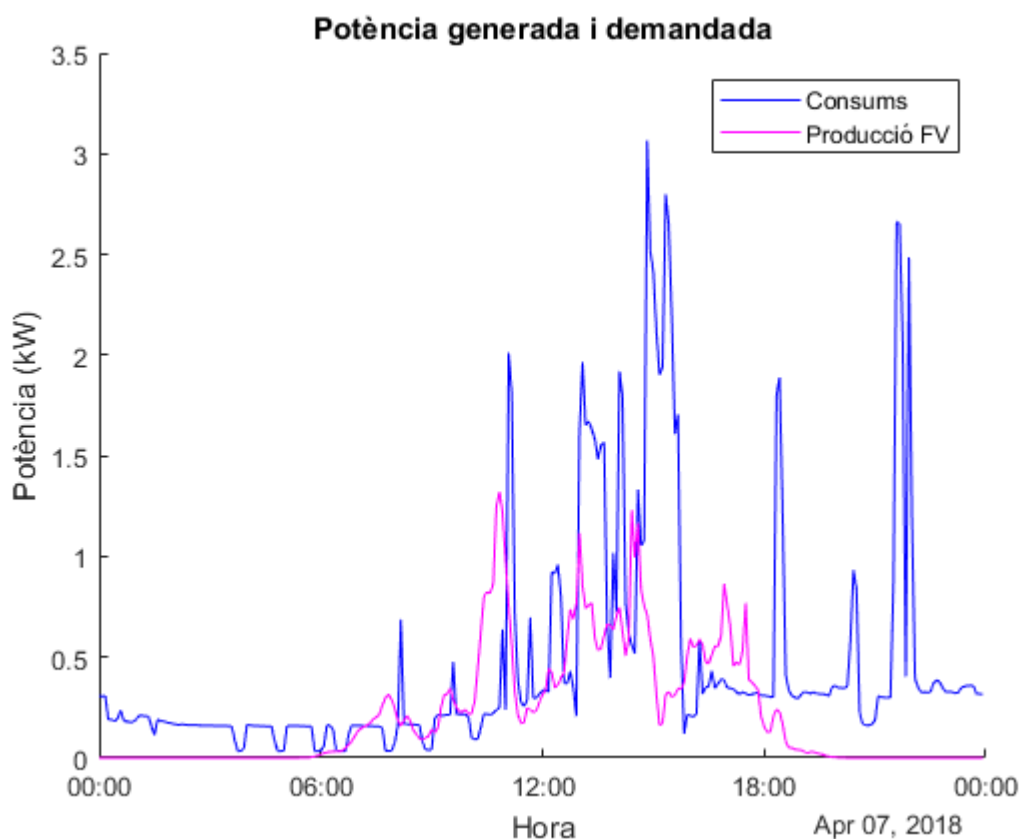


Figura 5.25. Producció fotovoltaica i consums de la microxarxa en un dia tipus. Elaboració pròpia.

Taula 5.2. Paràmetres necessaris pel càlcul de la producció FV.

Variable	Valor
Potència nominal (W)	320
Potència FV pic de la instal·lació (W)	2000
Nombre de mòduls necessaris	7
Eficiència del mòdul (%)	16,45
Tensió en el punt de màxima potència (V)	37,56
Àrea de cada mòdul (m ²)	1,92

El codi complet de MATLAB s'inclou en els annexos d'aquest projecte. En el mateix programa, es crea un fitxer de text amb els diferents valors de corrent consumits al llarg del dia 7 d'abril de 2018. Aquests corrents són necessaris per enviar-li a la càrrega electrònica APS i que l'inversor els pugui detectar. Per tant, en un mateix full de càlcul Excel es disposa dels consums (en kW i en A) per cada període de 5 minuts del dia 7 d'abril. Aquestes dades seran posteriorment llegides pel programa de LabVIEW emprant per realitzar l'assaig de l'escenari.

D'altra banda, com ja s'ha explicat anteriorment, l'activació del grup electrogen ha de ser manual. És per això que cal realitzar alguns càlculs abans de procedir a fer l'assaig. Aquests càlculs es basaran en la següent premissa: a l'inici del dia es partirà d'un estat de càrrega de les bateries conegut; en funció del consum energètic i la producció fotovoltaica durant el dia, es determinarà en quin moment la bateria assolirà un estat de càrrega massa reduït (en funció de les característiques tècniques de les bateries extretes del dimensionament i de criteris propis); quan s'arribi a aquest estat de càrrega, el *genset* s'activarà manualment durant el temps necessari per suplir els consums de la resta del dia i amb l'objectiu de mantenir el mateix estat de càrrega o un de molt similar a l'inici del dia següent.

Per realitzar aquests càlculs, es parteix de les corbes de potència generada i demandada mostrada a la Figura 5.25. Per obtenir el valor d'energia produïda en un període de temps determinat, és necessari treballar amb dades d'energia fotovoltaica produïda i energia consumida. La fórmula física en que es basa aquest procediment és:

$$E(t) = \int P(t) \cdot dt \quad (\text{Eq. 5.1})$$

On $E(t)$ és l'energia, $P(t)$, la potència i t , el temps considerat.

Per tant, amb l'ajuda de MATLAB es realitza la integral de les corbes anteriorment citades. La funció de MATLAB emprada és *cumtrapz(Y)*, sent Y la corba a integrar. La funció *cumtrapz(Y)* calcula la integral acumulativa aproximada de Y a través del mètode trapezoidal amb espaiat entre unitats. Aplicant aquesta funció a ambdues corbes, s'obté un valor d'energia produïda o consumida per cada període de 5 minuts, que es va acumulant al llarg del dia. Això permet conèixer els consums i la producció d'energia entre qualsevol interval d'hores, que és el que es buscava inicialment. Una manera de comprovar la correcta operació d'aquesta funció és comparar el valor d'energia consumida acumulada al final del dia amb el valor de consum d'energia obtingut a través del monitor d'energia emprat (Smappee). Pel dia 7 d'abril de 2018, el monitor Smappee va mesurar un consum de 11,21 kWh en tot el dia. L'últim valor calculat per la funció de MATLAB emprada indica que el consum energètic acumulat té un valor de 11,18 kWh. Ja que la diferència entre ambdós valors és mínima, es pot concloure que la funció emprada és l'adient.

Per decidir quin és el SoC inicial de les bateries al començament del dia (a les 0h), s'agafarà com a orientació el dimensionament realitzat per HOMER. Consultant les dades de HOMER per un dia amb el mateix perfil del dia 7 d'abril de 2018, es comprova que l'estat de càrrega inicial de les bateries a les 0h és del 85%, tal i com es veu a la Figura 5.26.

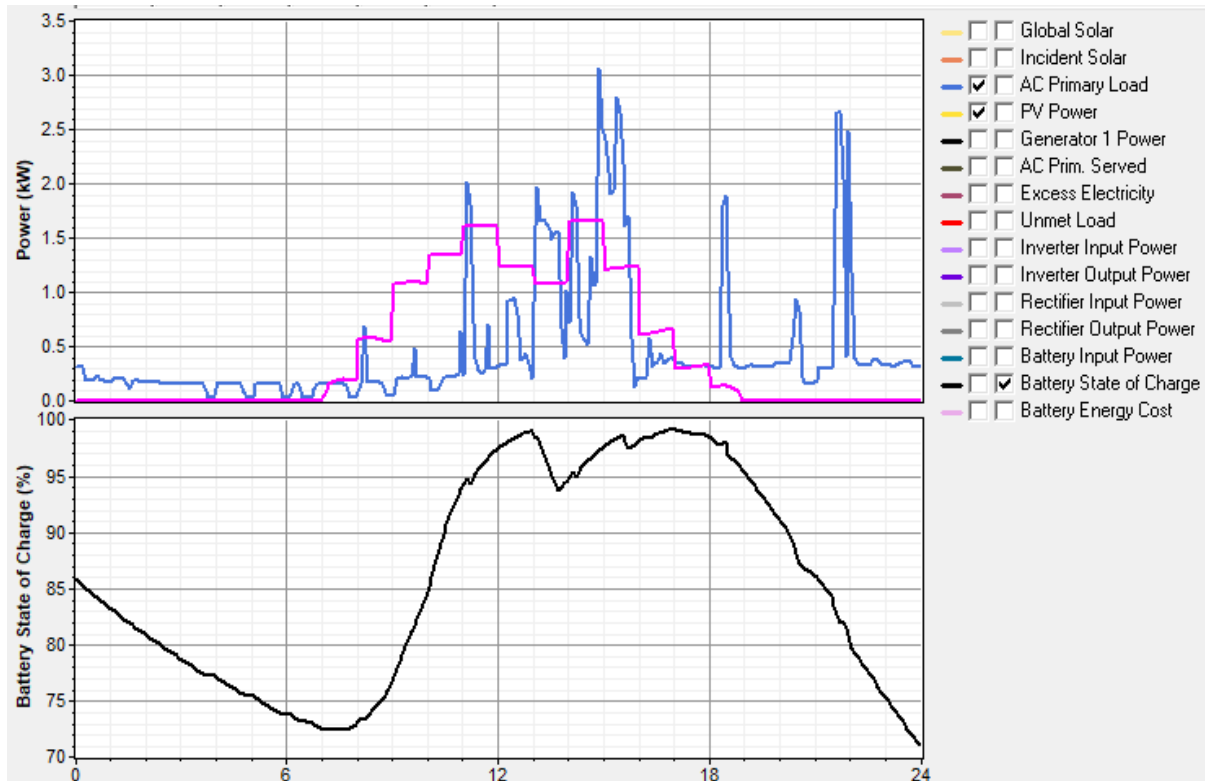


Figura 5.26. Dades del dimensionament amb HOMER pel dia tipus estudiat. Extret del programa HOMER.

Per a realitzar la simulació es pren un valor del 80% com a estat de càrrega inicial de les bateries. Cal recordar que la capacitat nominal de les bateries escollides en el dimensionament (6FM200D) és de 2,4 kWh (9,6 kWh entre tot el banc de bateries). Per tant, l'energia emmagatzemada inicialment a les bateries és un 80 % dels 9,6 kWh nominals, la qual cosa resulta en 8,16 kWh.

Fent un balanç energètic entre l'energia generada per la fotovoltaica i l'energia consumida, es determina l'energia emmagatzemada a les bateries i, d'aquesta manera, també es determina el seu estat de càrrega. Analitzant l'estat de càrrega al llarg del dia, es comprova que aquest baixa del límit de SoC mínim segons les especificacions tècniques (40 %) al voltant de les 19h. Ja que el recurs solar és insuficient per carregar les bateries en aquest moment del dia, és necessari activar el grup electrogen. S'ha considerat que les bateries es podran descarregar fins a un estat de càrrega mínim del 45 %. El moment del dia en que el SoC baixa del valor estipulat és a les 18:50h. És llavors quan el generador es connectarà i començarà a treballar a potència constant (2 kW).

Un altre aspecte escollit per l'autor del treball ha sigut el moment de deixar de generar energia amb el grup electrogen. Segons el perfil de consum mostrar a la Figura 5.25, es produeixen una sèrie de pics de potència demanda al final del dia. L'objectiu és carregar les bateries fins al moment immediatament anterior de l'inici d'aquests pics. Aquest moment correspon a les 21:30h. Per tant, el temps de

funcionament del *genset* és de 2 hores i 40 minuts (2,67 h). Com s'ha dit, el generador treballa a potència nominal, de manera que l'energia generada mentre roman engegat és de 5,33 kWh.

Seguint les premisses descrites en els paràgrafs anteriors, al fitxer de MATLAB explicat anteriorment se li afegeixen noves parts, corresponents a realitzar els càlculs corresponents per tal d'esbrinar el valor de l'estat de càrrega de les bateries i la quantitat d'energia de la que disposen en cadascun dels períodes en que s'ha dividit el dia. La Taula 5.3 mostra un resum de la divisió feta del dia tipus, amb informació sobre les bateries per cada període. L'última fila d'aquesta taula, que fa referència al nombre de cicle al que correspon el moment del dia, resultarà útil per a executar el programa de LabVIEW dedicat a verificar l'escenari.

Taula 5.3. Estat de les bateries i del *genset* en els moments del dia analitzats.

Terme	0h	18:50h	21:30h	23:55h
SoC (%)	80	44,8	90,8	75,3
Energia acumulada (kWh)	8,2	4,3	8,7	7,2
Estat del <i>genset</i>	Desactivat	S'activa	Es desactiva	Desactivat
Nombre de cicle o període de 5 minuts corresponent	1	227	260	288

La Figura 5.27 representa d'una banda els perfils de potència demandada i generada (fotovoltaica i grup electrogen) pel dia tipus seleccionat, així com l'evolució de l'estat de càrrega de les bateries en l'escenari en que el *genset* no s'activa i el SoC cau a valors no permesos i en l'escenari on el generador s'activa durant prop de tres hores.

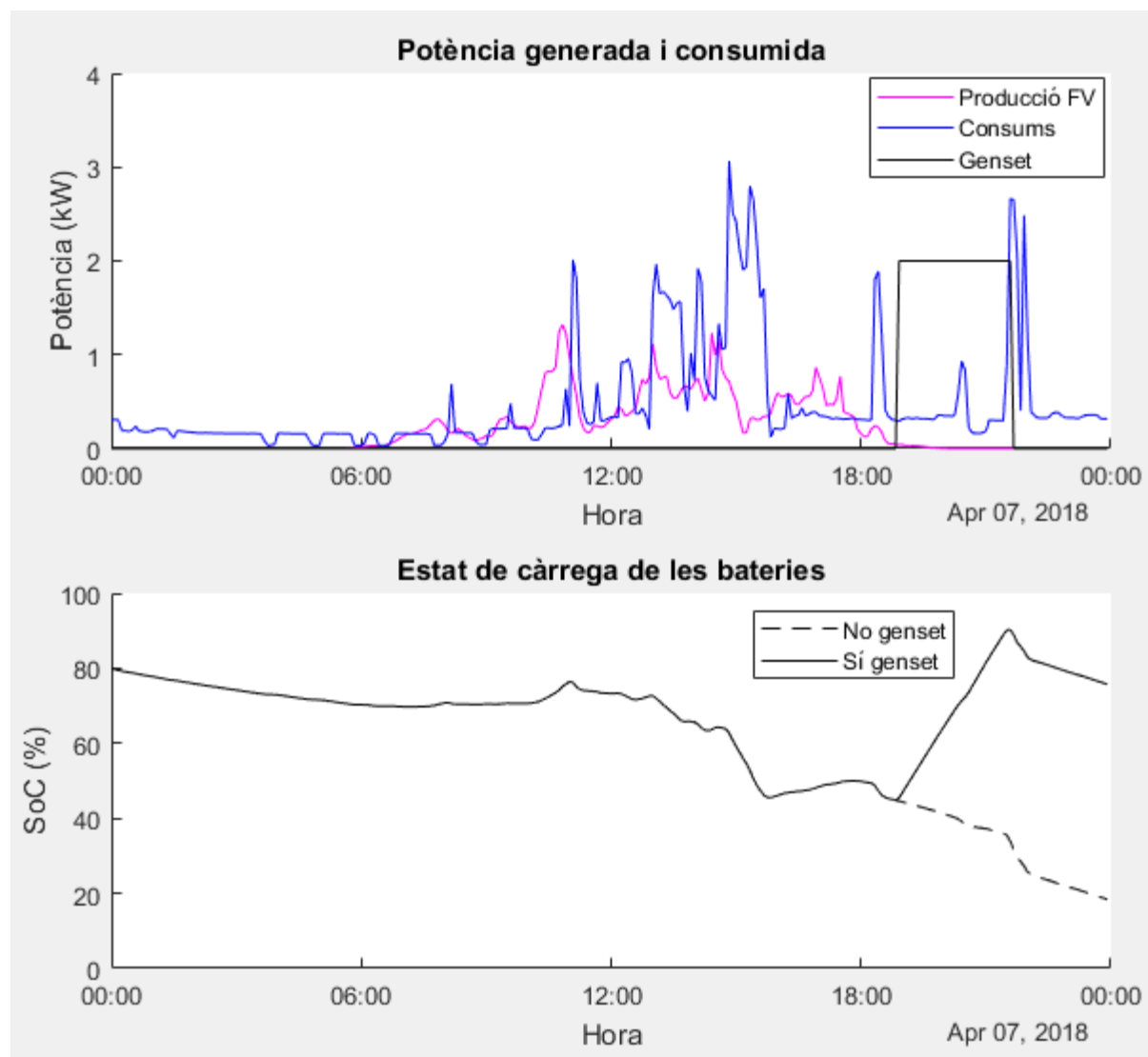


Figura 5.27. Representació dels perfils de demanda i generació de la microxarxa (superior). Evolució del SoC de les bateries (inferior). Elaboració pròpia amb MATLAB.

5.3. Programació

El programa principal dissenyat per controlar i monitoritzar els elements de la microxarxa estudiada s'ha desenvolupat amb el *software* de programació gràfica LabVIEW. Aquest programa agrupa bàsicament dos dels components de la microxarxa, l'emulador de generador electrogen i la càrrega electrònica programable.

Pseudocodi del programa

```

INICIO
{Lee parámetros: VISA resource name, Regulation Mode, Current Level,
Bank, Crest Factor, Frequency, Directori del fitxer d'on llegir
corrents, Directori on exportar dades APS, Adreça IP remota, Port
remot, Transaction ID, Unit ID};
{Lee constantes: Tipo de archivo a leer, número de hoja, tipo de
datos, número de filas y columnas inicial y final};
{Establece conexión con los equipos};
DESDE (i=0) HASTA 288
    HACER
        {Desagrega vector de corrientes};
        {Muestra valor de ciclo +1};
        {Lee múltiples registros};
        {Muestra indicadores: Tensió F-N (V), Corrent de càrrega (A),
Potència genset (W), Velocitat de rotació (rpm), Freqüència (Hz)/10};
        SI (ciclo = 226)
            {Inici = VERDADERO};
        SI (ciclo = 259)
            {Final = VERDADERO};
        SI (Enable_Load = VERDADERO)
            {Introduce corrientes al bloque de escritura de la APS};
            {Lee variables: I, P, V, S};
            {Grafica: V, I, P};
        FIN_SI
        SI ((Motor OR Confirmació) = VERDADERO)
            {Cambia a modo manual};
            {Enciende motor};
        SI_NO
            {Apaga motor};
            {Cambia a modo off};
        FIN_SI
        SI Càrrega es VERDADERO
            {Cierra el interruptor de carga};
        SI_NO
            {Abre el interruptor de carga};
            {Agrupa datos a exportar};
        FIN_SI
    FIN_DESDE
{Cierra conexión con APS y Genset};
{Exporta datos y muestra errores};
FIN
    
```

El programa complet desenvolupat en LabVIEW s'inclou als annexos d'aquest treball, tant el panell frontal com el diagrama de blocs. A mode d'exemple, la Figura 5.28 mostra els blocs corresponents a establir connexió amb la càrrega electrònica APS i la Figura 5.10 mostra el bloc necessari per establir connexió remota amb el controlador de *genset* IntelliLite.

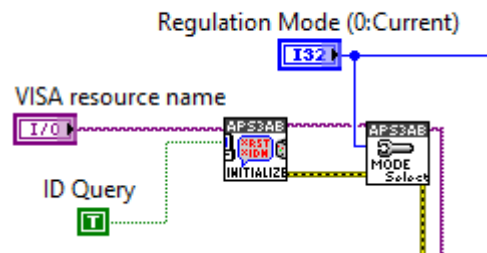


Figura 5.28. Paràmetres a introduir als blocs de la llibreria APS per establir connexió remota. Elaboració pròpia.

La funció principal del programa és monitoritzar les variables més importants de la càrrega i del generador electrogen (tensió, corrent, potència, velocitat de gir o freqüència) i exportar-les a un fitxer extern per tractar les dades juntament amb les descarregades de l'inversor Axpert.

La introducció dels corrents de consum per cada període de 5 minuts es realitza a partir d'un fitxer extern on es troben aquests valors. Ja que el període de temps analitzat a l'assaig és d'un dia, hi ha 288 períodes de 5 minuts. Aquest és l'interval mínim de temps amb el que es disposa de dades de consum de la microxarxa i cal aplicar aquesta base de temps a la resta d'elements de la microxarxa. Per aquest motiu, el llaç iteratiu programat a LabVIEW consta de 288 iteracions. Ja que el nombre de valors de corrents de consum ha sigut adaptat prèviament a la base de temps comentada de 5 minuts (mitjançant MATLAB), al introduir aquestes dades al llaç iteratiu del programa LabVIEW, el nombre d'iteracions ja vindria definit sense necessitat d'especificar-ho al bucle *for*.

Una altra limitació que té l'assaig realitzat és l'interval mínim de temps amb que l'inversor Axpert (no controlable des de LabVIEW) permet exportar dades (30 s). Per aquest motiu, cada iteració referent al *genset* i a la càrrega APS es produirà cada 30 segons. Això resulta en una durada de l'assaig de 2 hores i 24 minuts.

Mitjançant una eina de temps (bloc '*Wait (ms)*') situada a l'interior del bucle iteratiu, es produeix el que s'anomena escalament de temps de l'assaig. Aquest escalament resulta útil per assajos tan llargs que no es poden fer en temps real. En el cas de l'assaig d'aquest treball, es verifica un escenari diari en tan sols menys de tres hores. La Figura 5.29 mostra l'aspecte de l'eina de temps de LabVIEW que permet dur a terme aquest escalament.

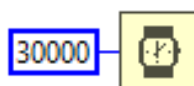


Figura 5.29. Bloc *Wait (ms)* per establir un temps d'espera entre iteracions en un bucle de LabVIEW.

El panell frontal del programa s'ha dissenyat de tal manera que quedin clars els paràmetres a introduir abans d'iniciar la simulació i de forma que els resultats es mostrin de la manera més entenedora possible, combinant indicadors numèrics, booleans i gràfics. En el cas de la part del programa corresponent a la monitorització de l'emulador de genset, l'aspecte del panell frontal és el mostrat a la Figura 5.30.

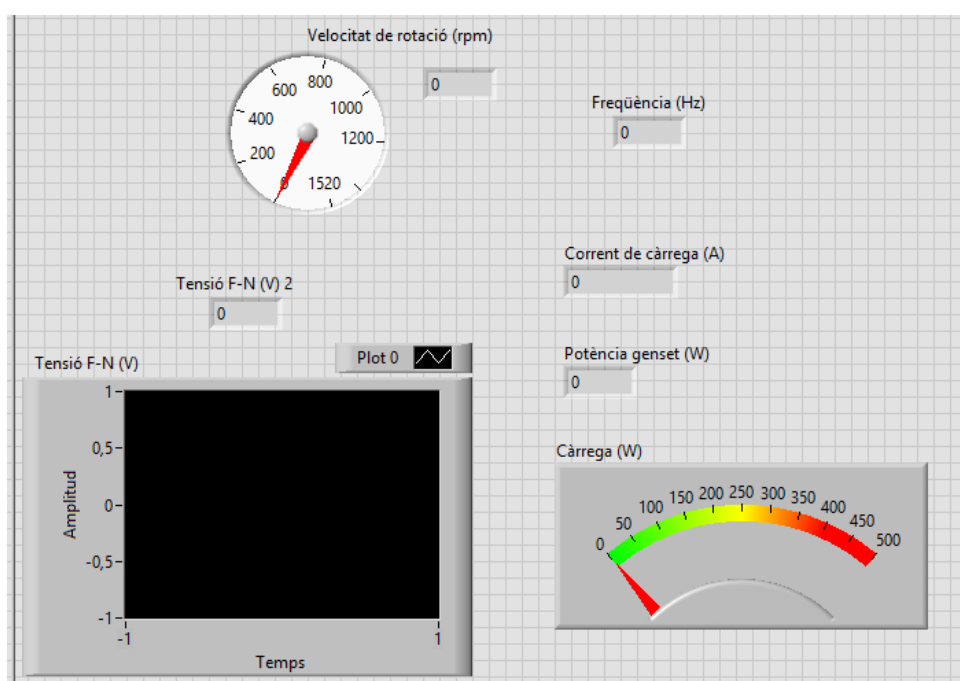


Figura 5.30. Aspecte del panell frontal de la part de monitorització del genset.

5.4. Resultats de l'assaig

Un cop la connexió amb els diferents equipaments és correcta i es tenen controlades les accions a realitzar durant l'assaig i els temps previstos de durada, es procedeix a realitzar la verificació pràctica de la microxarxa estudiada en aquest treball.

La Taula 5.4 resumeix els aspectes claus a tenir en consideració a l'hora de realitzar l'assaig. L'assaig té una durada equivalent de 24 hores.

Taula 5.4. Característiques principals de l'assaig.

Aspecte		Valor
Durada de l'assaig (temps real)		2 h 24 min
InteliLite AMF 25	IP	10.5.51.165
	Port remot	502
	Transaction ID	17
	Unit ID	1
APS 3B108-108	VISA Resource Name	En l'assaig realitzat: GPIB::1::INSTR <i>És un valor variable.</i>
	Mode de funcionament	CC
	Bank	1
	Crest Factor	0
	Frequency	50 Hz
	Interruptor <i>Enable Load</i>	ON
Arrencada i aturada de l'emulador de <i>genset</i>	Iteració o cicle d'activació del motor i de l'interruptor de càrrega (a través del programa LabVIEW)	223 aprox.
	Iteració o cicle de connexió del <i>genset</i> a la microxarxa (a través del magnetotèrmic del transformador)	226
	Iteració o cicle de desconnexió del <i>genset</i> de la microxarxa (a través del magnetotèrmic del transformador)	259

La funció d'exportar dades incorporada al programa de LabVIEW permet organitzar les dades monitoritzades per l'InteliLite AMF 25 i per la càrrega APS en un full de càlcul. Pel que fa a les dades monitoritzades per l'inversor Axpert, es descarreguen del programari (WatchPower) que aporta el fabricant. La intenció és combinar aquestes dades, seleccionar les més representatives o rellevants i tractar-les per fer-ne més fàcil la comprensió, mitjançant gràfiques, per exemple.

La mesura de la demanda de potència en cada període de 5 minuts (en kW) és aportada tant per la càrrega electrònica APS com per l'inversor Axpert. Si es comparen els perfils de càrrega corresponent, s'obté que no existeix pràcticament diferència entre ells, tal i com es veu a la Figura 5.31. La mínima diferència que hi pugui haver és deguda al rendiment de l'inversor, tot i que és molt elevat (al voltant del 90 %).

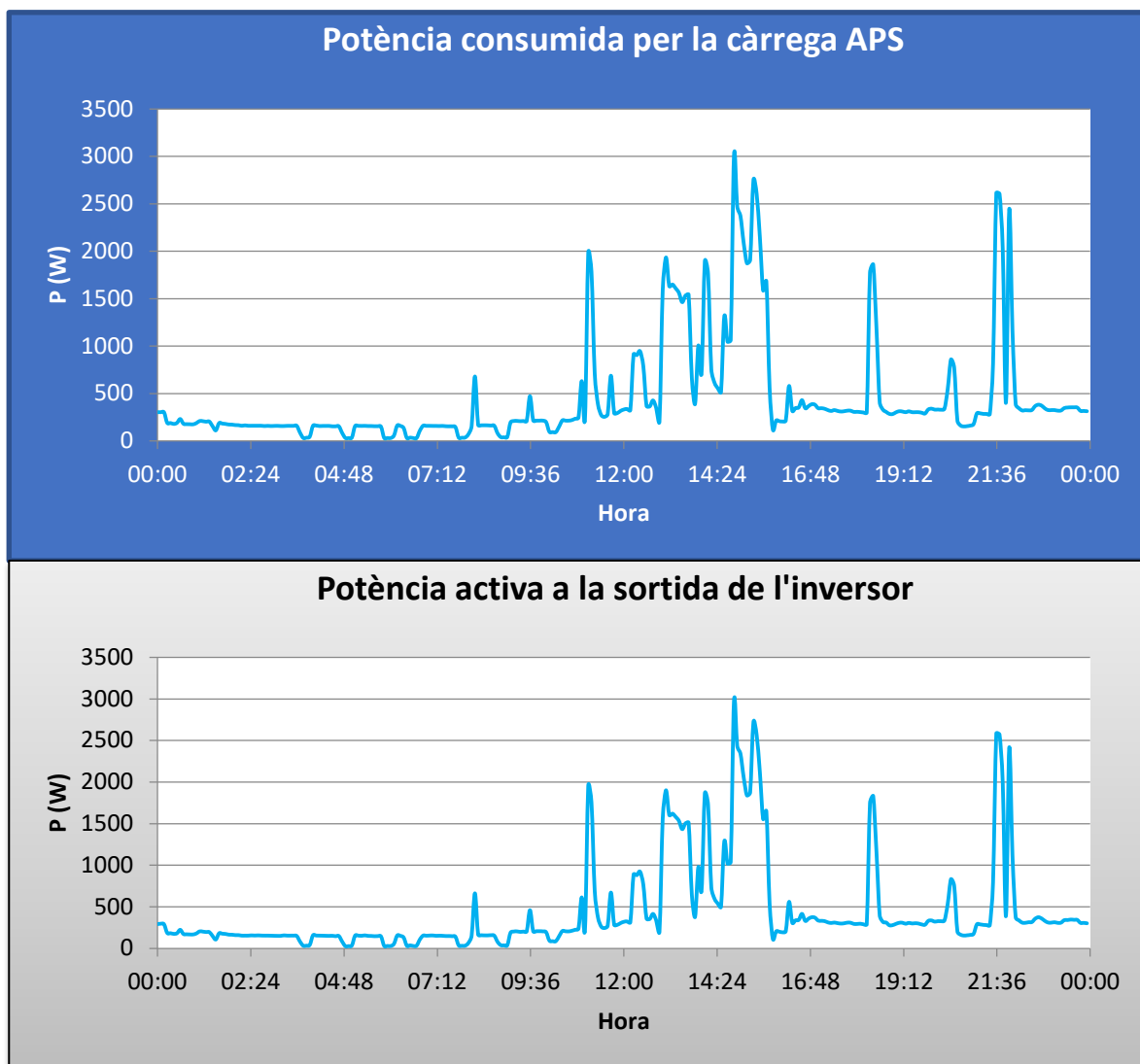


Figura 5.31. Potència demandada per la càrrega i a la sortida de l'inversor. Elaboració pròpia.

S'ha comprovat amb l'assaig que hi ha discrepàncies entre la mesura de potència indicada per la càrrega electrònica i els valors originals de consum, degut als errors de mesura propis de cada aparell.

També és oportú comprovar la diferència, si n'hi ha, entre la tensió a la sortida del grup electrogen i a l'entrada AC de l'inversor. Les mesures a comparar són la proporcionada per l'emulador de *genset* i per

l'inversor Axpert. Aquestes corbes es representen a la Figura 5.32. Pel que fa a la mesura de l'inversor, algunes petites modificacions o oscil·lacions són apreciables a la corba representada, mentre que a la mesura del generador, la corba sembla constant. Això és degut la diferència de precisió d'un equip i l'altre. Les mesures del controlador IntelLite són molt menys precises que les de l'inversor Axpert.

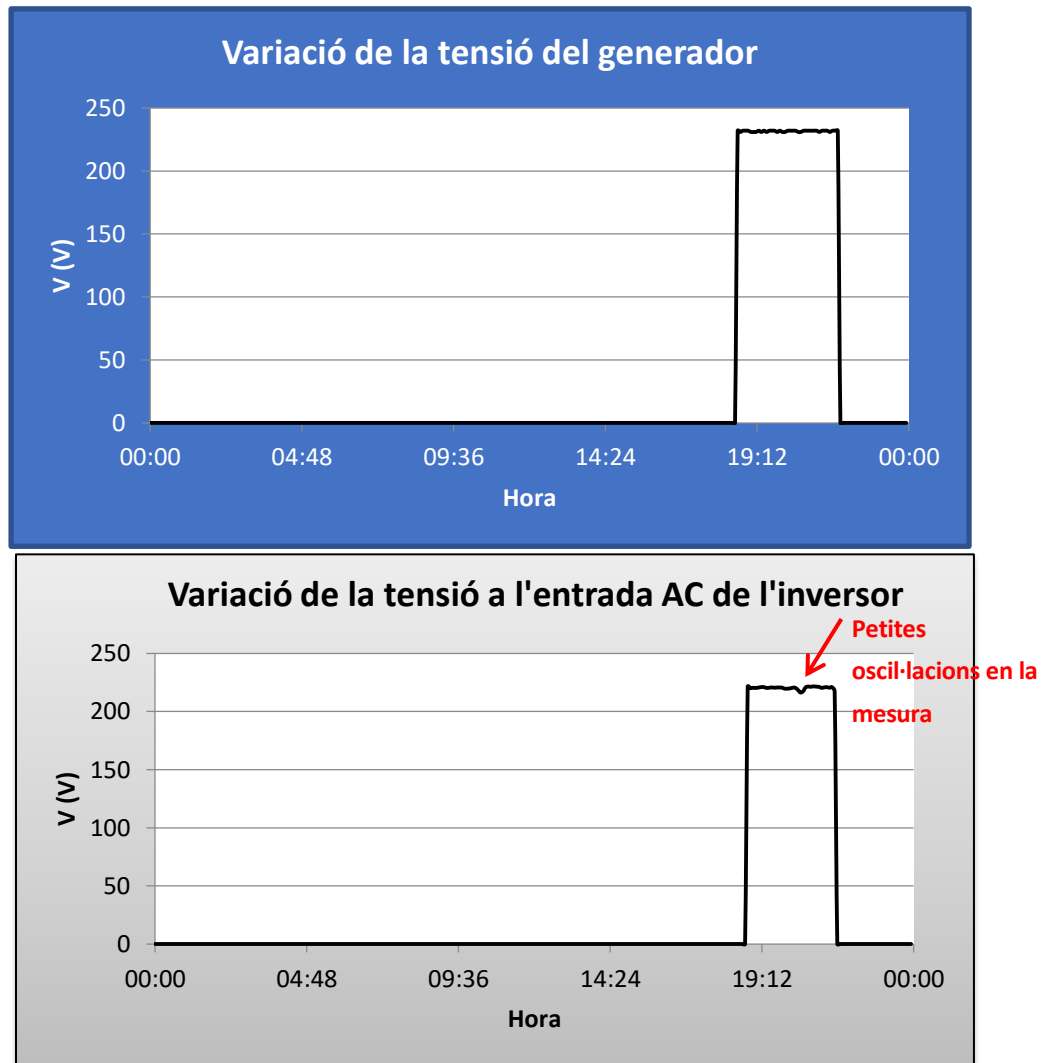


Figura 5.32. Diferència entre les dues mesures de tensió del generador de suport. Elaboració pròpia.

La Figura 5.33 mostra una representació gràfica de les potències de tots els equipaments que formen la microxarxa:

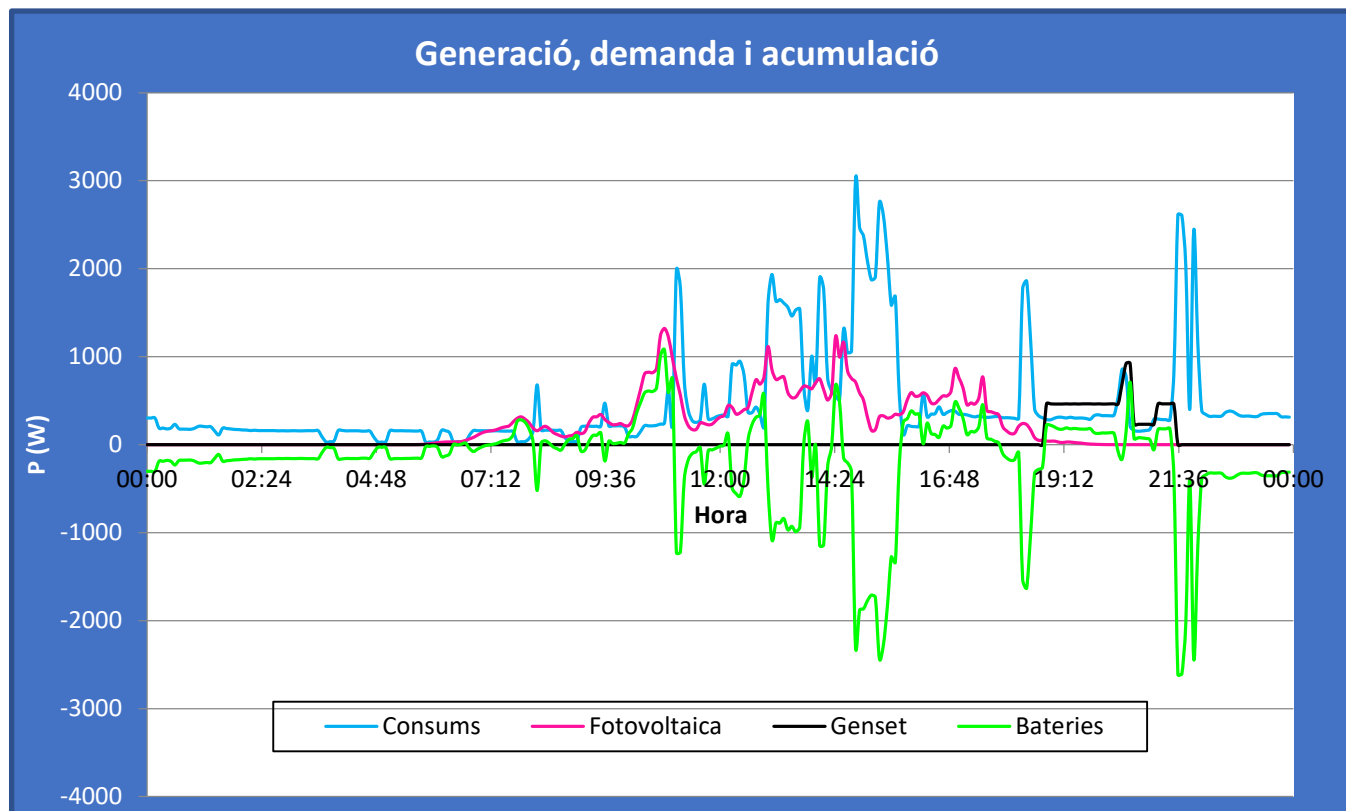


Figura 5.33. Potències de generació, acumulació i demanda. Elaboració pròpia.

Com era d'esperar, les dades numèriques extretes dels equipaments han permès comprovar el canvi que experimenta la freqüència, però sobretot la tensió a la sortida de l'inversor quan es connecta el generador electrogen a la microxarxa. Aquest fet queda reflectit a la Figura 5.34 i a la Figura 5.35. La tensió a la sortida de l'inversor Axpert pateix una elevada davallada del seu valor quan el generador de suport es connecta a la microxarxa (de 230 V a 220 V). Quan el generador està treballant a una potència propera a 1 kW, la tensió es redueix encara més fins als 217 V aproximadament. La tensió va augmentant o disminuint encara més en funció de si el *genset* treballa a més o menys potència. El mateix succeeix amb la freqüència, tot i que en menor mesura. A la Figura 5.35 es mostra clarament que en el moment d'engegar el grup electrogen, la freqüència passa d'un valor de 50 Hz a 50,3 Hz, i quan la potència del generador augmenta, la freqüència disminueix fins a 49,4 Hz.

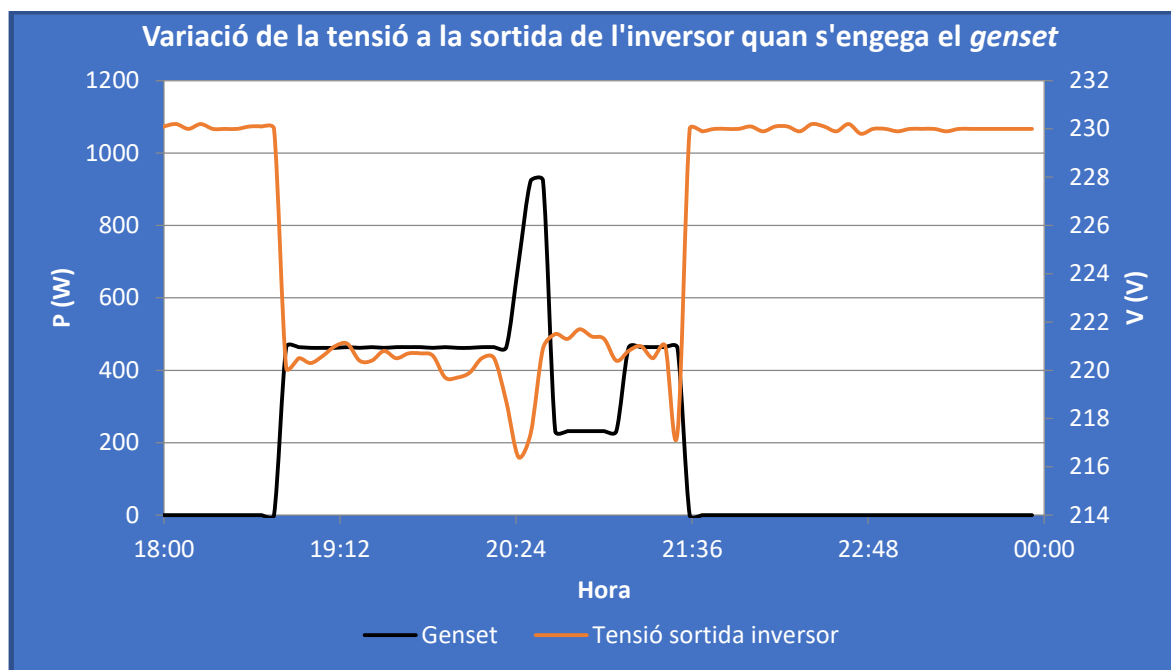


Figura 5.34. Dependència de la tensió de sortida de la potència de treball del genset. Elaboració pròpia.

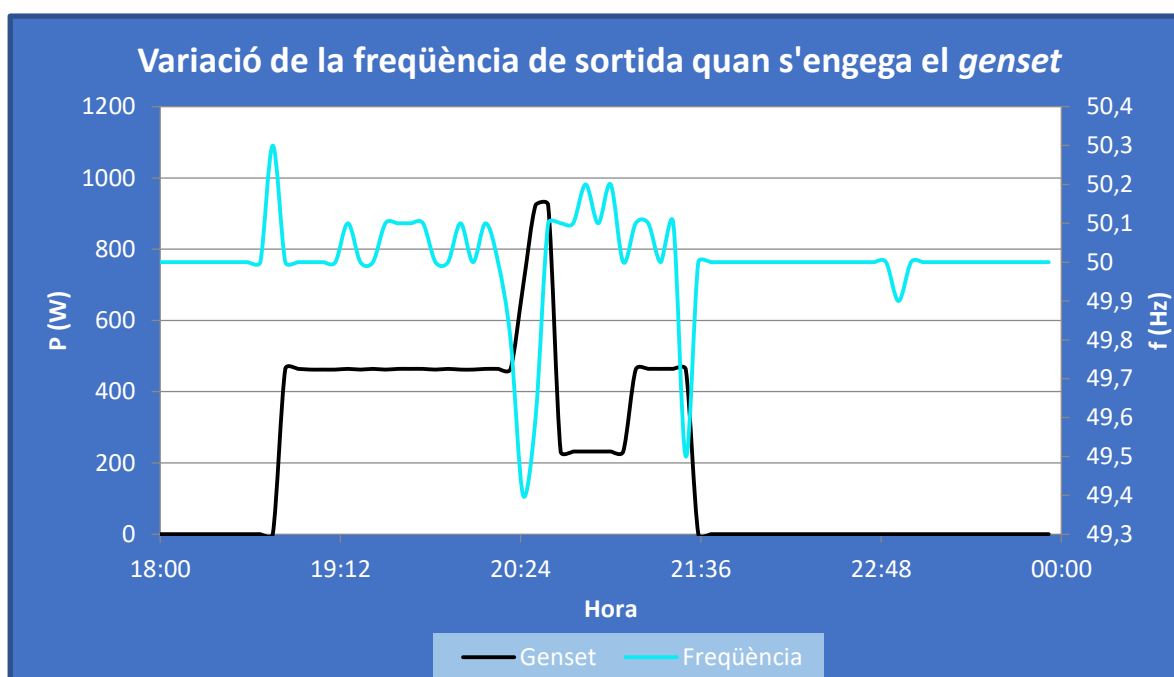


Figura 5.35. Dependència de la freqüència de sortida de la potència de treball del genset. Elaboració pròpia.

Aquests mecanismes de canvi de freqüència l'utilitzen algunes màquines per repartir les potències que han de subministrar a la càrrega.

6. Anàlisi de l'impacte ambiental

La microxarxa elèctrica d'estudi, al ser de tipus híbrid, té un cert consum de combustible fòssil i, per tant, una emissió d'una sèrie de contaminants. El grup electrogen constitueix la font més contaminant del sistema, per la qual cosa s'ha de reduir al mínim el seu ús.

El mateix programa emprat per fer el dimensionament de la instal·lació, HOMER Pro, et proporciona algunes dades en relació als contaminants emesos pel sistema energètic dimensionat. Aquests valors es recullen a la Taula 6.1.

Taula 6.1. Emissions contaminants de la microxarxa dissenyada.

Contaminant	Emissions (kg/any)
Diòxid de carboni	1249
Monòxid de carboni	3,08
Hidrocarburs no cremats	0,342
Partícules fines de matèria	0,232
Diòxid de sofre	2,51
Òxids de nitrogen	27,5

Aquests contaminants serien majors si no s'empressin fonts d'energia renovable.

D'altra banda, és interessant comentar que la utilització de paper durant la realització del treball ha estat mínima, augmentant així la sostenibilitat del mateix. No obstant això, l'ús d'electricitat ha estat força elevat (ús d'ordinadors, equips elèctrics, etc.), la qual cosa redueix en part la sostenibilitat abans comentada.

No ha sigut possible estimar el consum energètic del projecte, ja que els equipaments emprats es troben integrats en el laboratori E3PACS, on es duen a terme diversos experiments i proves amb freqüència i on hi treballen diferents persones.

Conclusions

En aquest apartat es presenten les conclusions del treball extretes després de la seva realització durant el quadrimestre de primavera del curs 2017-2018 del Grau en Enginyeria de l'Energia, a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). A banda d'explicar les conclusions generals i personals del treball, s'analitza el compliment dels objectius plantejats a l'inici del projecte i es presenta el possible treball futur que es podria realitzar per continuar el projecte.

Conclusions generals

Un dels objectius implícits en la realització del Treball de Final de Grau és aplicar els coneixements de diferents branques de l'enginyeria adquirits durant els estudis de Grau. Es pot concloure que durant tot el treball s'han aplicat aquests coneixements, especialment del camp de l'energia, per donar solució als problemes que anaven sorgint.

Pel que fa a l'objectiu relatiu a la demostració de la viabilitat tècnica i econòmica d'una microxarxa elèctrica aïllada híbrida en alterna, es conclou que els resultats han estat satisfactoris. L'eina de simulació de sistemes energètics HOMER Pro ha sigut de gran utilitat per a fer més eficient el dimensionament de la instal·lació, ja que es tenen en consideració més paràmetres que en un dimensionament calculat de forma manual. Les simulacions fetes amb HOMER han permès conèixer diverses alternatives d'escenaris a estudiar, entre les quals es troba l'escenari plantejat inicialment, que correspon a una microxarxa elèctrica amb generació fotovoltaica, amb suport de bateries i d'un grup electrogen, que suplís un habitatge amb un perfil de consums típic de l'àmbit domèstic i que es trobés completament aïllat de la xarxa elèctrica.

El dimensionament resultant permet conèixer la necessitat dels diferents equipaments que integren la microxarxa. La potència fotovoltaica requerida és de 2 kW, el nombre de bateries necessari és 4 (2 serie x 2 paral·lel), un inversor/carregador de 2 kW i un generador auxiliar de 2 kW alimentat amb dièsel. Amb aquestes dades es pot concloure que la mida del sistema energètic dimensionat no és gaire elevada, la qual cosa facilitaria la seva implantació en multitud d'habitatges del país on la instal·lació d'un grup electrogen sigui factible. Amb això quedaria provada la viabilitat tècnica del sistema com un element de transició cap a una microxarxa basada en renovables. A més, el dimensionament realitzat a partir de programari d'optimització com HOMER permet assolir un altre dels objectius plantejats, minimitzar l'ús de la font no renovable (grup electrogen) i verificar si és possible la seva substitució incrementant les renovables i el nombre de bateries, quan la tecnologia i l'economia ho permetin.

D'altra banda, s'han analitzat les despeses econòmiques que implica la instal·lació d'aquesta microxarxa elèctrica, resultant en uns períodes de retorn dins del rang usual en aquest tipus de sistemes energètics (en 25 anys ja s'obtenen beneficis). Es pot concloure que l'element que més despesa econòmica implica és el banc de bateries, les quals tenen un preu força elevat i una vida útil molt limitada. Una major potenciació de la recerca científica en l'àmbit dels sistemes d'emmagatzematge per part dels governs de països líders mundials originaria una millora d'aquests sistemes a curt termini, augmentant el seu ús a nivell mundial, reduint-se així el seu cost i potenciant, al seu torn, les microxarxes elèctriques com a sistema d'alimentació d'habitatges i edificis, entre d'altres sectors.

Finalment, també s'ha pogut realitzar una verificació pràctica amb equips de laboratori, tal i com s'havia plantejat inicialment. L'assaig realitzat s'ha basat en interconnectar uns mòduls fotovoltaics i un sistema de bateries connectats a l'inversor Axpert amb un emulador de grup electrogen i unes càrregues electròniques programables. Per l'activació i desactivació de l'emulador de *genset* s'agafa com a base les simulacions prèvies realitzades amb MATLAB. Algunes funcionalitats s'han realitzat manualment degut als problemes amb les comunicacions de l'inversor fotovoltaic, Axpert, del laboratori i a les connexions elèctriques del *genset*. La informació del protocol de comunicacions amb l'inversor Axpert és insuficient per a poder desenvolupar les comunicacions del control. De l'assaig se n'ha pogut extreure dades (potència fotovoltaica, tensió del generador, etc.), les quals han permès elaborar unes gràfiques per analitzar el comportament de la microxarxa quan se li connecten o desconnecten diversos dels seus components.

Conclusions personals

Com a conclusions generals es vol posar èmfasi en l'experiència guanyada sobretot en l'etapa del projecte duta a terme al laboratori E3PACS. L'autor d'aquest treball considera que l'experiència treballant amb equipaments pràctics durant el grau universitari d'enginyeria no és suficient per fer que l'alumne tingui coneixements més profunds dels aspectes teòrics vists a classe. D'aquesta manera, haver pogut compartir el laboratori E3PACS amb altres estudiants i professors ha permès l'autor adquirir coneixements addicionals als adquirits durant el grau en Enginyeria de l'Energia.

Un exemple del comentat anteriorment és en relació als protocols de comunicacions dels equipaments. A la teoria vista classe es parla de sistemes de gestió de l'energia que interconnecten diferents equipaments que es comuniquen entre ells per actuar d'una forma o d'una altra. Tanmateix, no es fa cap menció sobre com s'implementa aquesta comunicació entre equips. Haver dut a terme una part del projecte en un laboratori ha ajudat l'autor a entendre algun dels protocols de comunicacions més emprats en aquests casos, com és el Modbus/TCP, i a poder implementar

d'una forma pràctica els conceptes vistos a classe en relació a un Energy Management System i a una microxarxa.

El projecte en general també ha forçat l'autor a repassar i aprofundir en els coneixements sobre el funcionament d'alguns dels *softwares* i llenguatges de programació més emprats en enginyeria, com el LabVIEW o el MATLAB.

Treball futur

A continuació es presenten algunes línies de desenvolupament i millora d'aquest treball en el futur.

- Un dels punts més importants que es podria treballar en un escenari futur d'aquest treball és aconseguir automatitzar totalment el sistema treballat al laboratori. La solució al problema sorgit en aquest treball passa per estudiar amb profunditat l'inversor Axpert i el seu sistema de comunicacions.
- La microxarxa elèctrica dissenyada inclou com a fonts d'energia una instal·lació de mòduls fotovoltaics i un generador dièsel de suport. Un possible escenari futur seria estudiar l'addició de nous recursos energètics, preferentment renovables, a la microxarxa.
- Un treball futur podria valorar la opció de connexió amb altres microxarxes i comprovar com varia el dimensionament, la viabilitat tècnica i econòmica, entre d'altres indicadors.

Pressupost

Desglossament de costos

- **Costos d'enginyeria.** Són aquells que fan referència al personal que treballa en el desenvolupament del projecte. Els tipus de treballadors presents en el projecte són:
 - Director del projecte. S'encarrega de definir la metodologia de treball i d'establir els objectius i abast del projecte. També revisa i supervisa la realització del projecte en tot moment.
 - Enginyer junior. S'encarrega de la documentació del treball i dels aspectes més tècnics del dimensionament de la microxarxa elèctrica.
 - Programador. La seva tasca és desenvolupar diversos programes en diferents llenguatges de programació per tal de fer les simulacions i verificacions o assaigs pràctics pertinents, en funció de les indicacions de caire energètic rebudes per part de l'enginyer junior.

La **Taula 0.1** recull els costos associats a l'enginyeria.

Taula 0.1. Costos d'enginyeria del projecte.

Treballador	Cost (€/h)	Hores treballades	Cost total
Director del projecte	35	100	3500
Enginyer junior	10	600	6000
Programador	9	300	2700
TOTAL			12200

- **Costos materials.** Aquest tipus de costos fan referència als materials o equips emprats en la realització del treball. La presenta un resum d'aquests costos.

Taula 0.2. Costos materials del projecte.

Concepte	Cost (€)
Material d'oficina (inclòs ordinador personal)	800
Llicència de LabVIEW (bàsic)	400
Llicència de HOMER	280
Llicència de MATLAB	800
Llicència Microsoft Office	100
Monitor energètic Smappee	260
TOTAL	2640

Cost total

Taula 0.3. Cost total del projecte.

Concepte	Cost (€)
Costos d'enginyeria	12200
Costos materials	2640
IVA (21%)	3116,4
TOTAL	17956,4

Bibliografia

1 kVA-5 kVA INVERTER/CHARGER., 2008. ISBN 3032783534. DOI 10.1007/SpringerReference_28001.

Adaptive Power Systems., 2014. *3B Series Programmable AC & DC load*.

ATERSA, G.E. *Módulo fotovoltaico A-320M*.

ComAp., 2009. *Communication Guide*.

ComAp. A: [en línia]. [Consulta: 10 maig 2018]. Disponible a: <https://www.comap-control.com/products/detail/intelilite-nt-amf-25>.

Energía - EUROPA | Unión Europea. A: [en línia]. [Consulta: 19 abril 2018]. Disponible a: https://europa.eu/european-union/topics/energy_es.

Global Guide IntelliLite AMF 25. A: .p. 1-708.

Google Maps. A: [en línia]. [Consulta: 27 abril 2018]. Disponible a: <https://www.google.es/maps/@41.3623604,2.0424091,11.5z?hl=ca>.

Grupos Electrógenos. A: [en línia]. [Consulta: 10 maig 2018]. Disponible a: https://todoengeneradores.com/epages/ea8719.sf/?Locale=es_ES&ObjectPath=/Shops/ea8719/Products/NT6100SE-3&ViewAction=ViewProductViaPortal&gclid=EAAlaQobChMIgN60kLy12wIV1vhRCh2etQczEAQYASABEgIYQfD_BwE.

HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids. A: [en línia]. [Consulta: 6 maig 2018]. Disponible a: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.

Instituto de Energía Solar., 2017. Gráficos significativos energía solar fotovoltaica. A: .

Interruptor magnetotérmico. A: [en línia]. [Consulta: 28 abril 2018]. Disponible a: http://www.upv.es/electrica/material_tecno/Transparencias_PDF/T2/tema2-3.pdf.

ISO 50001:2011(en), Energy management systems — Requirements with guidance for use. A: [en línia]. [Consulta: 20 abril 2018]. Disponible a: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:en>.

KeyAndCloud. A: [en línia]. [Consulta: 15 maig 2018]. Disponible a: <https://www.keyandcloud.com/valor-residual/>.

López-Vázquez, J.C., 2016. *Estudio de la situación actual de las Smart Grids*. Universidad de Cantabria.

Martínez Díaz, M. del M., 2017. Stand-alone hybrid renewable energy systems (HRES). A: *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)* [en línia]. Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/112213>.

MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico. A: [en línia]. [Consulta: 18 abril 2018]. Disponible a:

<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.

Merkasol. A: [en línia]. [Consulta: 30 maig 2018]. Disponible a: <https://www.merkasol.com/Inversor-Cargador-Axpert-MKS-5000-24V-80ah-MPPT>.

MODICON Inc., 1996. *Modicon modbus protocol reference guide* [en línia]. Disponible a: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modicon+Modbus+Protocol+Reference+Guide#0>.

National Instruments.MOVBUS Library for LabVIEW. A: [en línia]. [Consulta: 15 maig 2018]. Disponible a: <http://www.ni.com/example/29756/en/>.

Natural Technology Systems. A: [en línia]. [Consulta: 30 maig 2018]. Disponible a: <http://www.naturaltechnology.com.au/new2016/product/sonnenschein-solar-block-battery/>.

Nergiza. A: [en línia]. [Consulta: 25 abril 2018]. Disponible a: <https://nergiza.com/me-saltara-el-icp-si-bajo-la-potencia-contratada/>.

OSI Batteries. A: [en línia]. [Consulta: 10 maig 2018]. Disponible a: <https://www.osibatteries.com/p-18390-vision-6fm200d-x-battery-12v-200ah-sealed-rechargeable-deep-cycle.aspx>.

Photovoltaic Geographical Information System. A: [en línia]. [Consulta: 2 maig 2018]. Disponible a: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>.

Piqué, R., 2017. Microxarxes. Aproximació MEDSOLAR. A: .

Precios de los derivados del petróleo: España 2018 | datosmacro.com. A: [en línia]. [Consulta: 30 abril 2018]. Disponible a: <https://www.datosmacro.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion/espana>.

Smappee (Solar) Energy Monitor Installation Manual., 2017.

Smappee reports energy consumption for all your home appliances | TechHive. A: [en línia]. [Consulta: 16 abril 2018]. Disponible a: <https://www.techhive.com/article/2857701/weird-name-cool-tool-smappee-monitors-and-reports-energy-consumption-for-each-of-your-homes-applian.html>.

Velasco, G., 2015. Grid-PV-Diesel Hybrid System Management. A: .

Velasco, G. et al., 2015. Grid-PV-Diesel Hybrid System Management. Application to MED-Solar Project Scenarios. A: .

Velasco, G. *Recursos Energéticos*.

Villafáfila, R., 2016. *Almacenamiento*.

Villafáfila, R., 2017. *Microrredes*.

Villafáfila Robles, R., 2017. *Introducción a las Redes Eléctricas Inteligentes*.

Voltronic Power.Axpert MKS Charger / Inverter Service manual. A: . p. 1-27.

Annex A

Codi dels scripts de MATLAB

Tractament de les dades de consum obtingudes amb Smappee

```
close all
clear all
clc
%% Agrupació dels consums setmanals
p1=xlsread('02-04-18 a 09-04-18','Sheet','C2:C2017');
h1=xlsread('02-04-18 a 09-04-18','Sheet','A2:A2017');
p2=xlsread('09-04-18 a 15-04-18','Sheet','C2:C2017');
h2=xlsread('09-04-18 a 15-04-18','Sheet','A2:A2017');
p3=xlsread('16-04-18 a 22-04-18','Sheet','D2:D2017');
h3=xlsread('16-04-18 a 22-04-18','Sheet','B2:B2017');
p4=xlsread('23-04-18 a 29-04-18','Sheet','D2:D2017');
h4=xlsread('23-04-18 a 29-04-18','Sheet','B2:B2017');
p=[p1' p2' p3' p4'];
h=[h1' h2' h3' h4'];
t=datetime(h,'ConvertFrom','excel');
plot(t,p)
title('Consums mes típic')
xlabel('Hora')
ylabel('Potència (kW)')
pmax=max(p);
pmin=min(p);
tmax=t(find(p==pmax));
tmin=t(find(p==pmin));

%% Escriure en un fitxer .txt un vector de consums repetint el mes típic
tot l'any
power= repmat(p,1,13);
fid=fopen('MesTípic.txt','wt');
fprintf(fid, '%f \n', power);
fclose(fid);true;
```

Simulació d'un dia tipus desfavorable escollit

```
close all
clear all
clc
%% Lectura de la irradiància del 05 de maig de 2018
irradiancia=xlsread('Irradiància 05 maig (dia
dolent)','Hoja1','H2:H86401');
%% Mitjana de cada període de 5 minuts
i=[];
in=1;
f=300;
for n=1:288 %Vull un vector de 288 valors (períodes de 5 minuts)
    mitjana=mean(irradiancia(in:f));
    i(n)=mitjana;
```

```

n=n+1;
in=f+1;
f=f+300;
end
%% Representació gràfica de la potència FV i dels consums
N=7; %nombre de mòduls de 320 W per a una potència pic de 2 kW
A=1.92; %àrea de cada mòdul
ef=0.1645; %eficiència del mòdul
potenciaFV=i/1000*N*A*ef;
h=xlsread('02-04-18 a 09-04-18','Sheet','A1442:A1729');
t=datetime(h,'ConvertFrom','excel');
subplot(2,2,1)
plot(t,potenciaFV,'Color','y')
hold on
c=xlsread('02-04-18 a 09-04-18','Sheet','C1442:C1729');
plot(t,c,'Color','b')
title('Potència generada i consumida (kW)')
xlabel('Hora')
ylabel('Potència (kW)')
legend('Producció FV','Consums')
%% Obtenció d'un vector de corrents a partir dels consums en kW
corrents=c*1000/230;
power= repmat(corrents,1,1);
fid=fopen('Corrents05maig.txt','wt');
fprintf(fid, '%f \n', power);
fclose(fid);true;
%% Càlcul de l'energia a partir de la integral
AreaConsums=cumtrapz(c); %Les unitats són de kW*període de 5 minuts
econsumida=AreaConsums/12; %Ja que en una hora hi ha 12 períodes de 5
minuts
AreaFV=cumtrapz(potenciaFV);
eproduida=transpose(AreaFV/12);
eemmagatzemada=0.8*9.6; %SoC inicial
e=[];
for n=1:288
    if n==1
        ebateries=eproduida(n)-econsumida(n);
    else
        ebateries=(eproduida(n)-eproduida(n-1))-(econsumida(n)-econsumida(n-1));
    eemmagatzemada=eemmagatzemada+ebateries;
end
    if eemmagatzemada>9.6
        eemmagatzemada=9.6;
    elseif eemmagatzemada<0
        eemmagatzemada=0;
    end
    e(n)=eemmagatzemada;
    n=n+1;
end
SoC=(e/9.6)*100;
hold off
subplot(2,2,2)
plot(t,SoC,'Color','k')
title('Estat de càrrega de les bateries (sense genset)')
xlabel('Hora')
ylabel('SoC (%)')
%% Determinació de les hores d'engegada i apagada del genset

```

```
%Es decideix que el genset s'activi quan el SoC de les bateries baixa del
48%. Això succeeix a la iteració 235, corresponent a les 19.30h
engegada=t(227);
SoCengegada=SoC(227);
Eengegada=SoCengegada/100*9.6;
%Els pics comencen a les 21.30, o cicle 260
DuradaGenset=2.67; %El genset s'activa de 18.50h a 21.30h
Egenset=2*DuradaGenset; %El genset treballa a potència nominal, 2 kW.
abanspics=c(227:259);
Consumabanspics=trapz(abanspics)/12;
Eabanspics=SoC(227)/100*9.6+Egenset-Consumabanspics;
SoCabanspics=(Eabanspics/9.6)*100;
%Després dels pics
pics=c(260:266);
Consumpics=trapz(pics)/12;
SoCfinal=(Eabanspics-Consumpics)/9.6*100;
%% Simulació amb incorporació del genset
gen=[repmat(0,226,1);repmat(2,33,1);repmat(0,29,1)];
egen=cumtrapz(gen)/12;
eemmagatzemada2=0.8*9.6; %SoC inicial
eFV=eproduida;
e2=[];
ebateries2=eFV(1)-econsumida(1);
eemmagatzemada2=ebateries2+eemmagatzemada2;
for n=2:288
    ebateries2=(eFV(n)-eFV(n-1))-(econsumida(n)-econsumida(n-
1))+ (egen(n)-egen(n-1));
    eemmagatzemada2=eemmagatzemada2+ebateries2;
    if eemmagatzemada2>9.6
        eemmagatzemada2=9.6;
    elseif eemmagatzemada2<0
        eemmagatzemada2=0;
    end
    e2(n)=eemmagatzemada2;
    n=n+1;
end
SoC2=(e2/9.6)*100;
subplot(2,2,3)
plot(t,potenciaFV,'Color','y')
hold on
plot(t,c,'Color','b')
plot(t,gen,'Color','k')
title('Potència generada i consumida (kW)')
xlabel('Hora')
ylabel('Potència (kW)')
legend('Producció FV','Consums','Genset')
subplot(2,2,4)
plot(t,SoC2,'Color','k')
title('Estat de càrrega de les bateries (amb genset)')
xlabel('Hora')
ylabel('SoC (%)')
legend('Escenari sense genset','Escenari amb genset')
```

Taula Excel

Algunes dades de potència, a mode d'exemple, del dia tipus escollit pel que fa a consums de la microxarxa

Date	Total [W]	Total [kW]	Date	Total [W]	AlwaysOn [W]
7/4/2018 0:00	307,20	0,3072	03/04/2018 23:55	303,60	33,00
7/4/2018 0:05	306,00	0,3060	03/04/2018 23:50	290,40	33,00
7/4/2018 0:10	307,20	0,3072	03/04/2018 23:45	152,40	33,00
7/4/2018 0:15	189,60	0,1896	03/04/2018 23:40	157,20	33,00
7/4/2018 0:20	190,80	0,1908	03/04/2018 23:35	180,00	33,00
7/4/2018 0:25	181,20	0,1812	03/04/2018 23:30	234,00	33,00
7/4/2018 0:30	195,60	0,1956	03/04/2018 23:25	286,80	33,00
7/4/2018 0:35	235,20	0,2352	03/04/2018 23:20	290,40	33,00
7/4/2018 0:40	186,00	0,1860	03/04/2018 23:15	290,40	33,00
7/4/2018 0:45	180,00	0,1800	03/04/2018 23:10	292,80	33,00
7/4/2018 0:50	177,60	0,1776	03/04/2018 23:05	292,80	33,00
7/4/2018 0:55	177,60	0,1776	03/04/2018 23:00	297,60	33,00
7/4/2018 1:00	189,60	0,1896	03/04/2018 22:55	298,80	33,00
7/4/2018 1:05	211,20	0,2112	03/04/2018 22:50	241,20	33,00
7/4/2018 1:10	208,80	0,2088	03/04/2018 22:45	177,60	33,00
7/4/2018 1:15	207,60	0,2076	03/04/2018 22:40	181,20	33,00
7/4/2018 1:20	205,20	0,2052	03/04/2018 22:35	184,80	33,00
7/4/2018 1:25	157,20	0,1572	03/04/2018 22:30	304,80	33,00
7/4/2018 1:30	112,80	0,1128	03/04/2018 22:25	307,20	33,00
7/4/2018 1:35	190,80	0,1908	03/04/2018 22:20	307,20	33,00

7/4/2018 1:40	183,60	0,1836	03/04/2018 22:15	313,20	33,00
7/4/2018 1:45	181,20	0,1812	03/04/2018 22:10	333,60	33,00
7/4/2018 1:50	175,20	0,1752	03/04/2018 22:05	340,80	33,00
7/4/2018 1:55	174,00	0,1740	03/04/2018 22:00	379,20	33,00
7/4/2018 2:00	169,20	0,1692	03/04/2018 21:55	439,20	33,00
7/4/2018 2:05	165,60	0,1656	03/04/2018 21:50	333,60	33,00
7/4/2018 2:10	164,40	0,1644	03/04/2018 21:45	292,80	33,00
7/4/2018 2:15	166,80	0,1668	03/04/2018 21:40	292,80	33,00
7/4/2018 2:20	164,40	0,1644	03/04/2018 21:35	1.312,80	33,00
7/4/2018 2:25	163,20	0,1632	03/04/2018 21:30	474,00	33,00
7/4/2018 2:30	163,20	0,1632	03/04/2018 21:25	309,60	33,00
7/4/2018 2:35	163,20	0,1632	03/04/2018 21:20	319,20	33,00
7/4/2018 2:40	162,00	0,1620	03/04/2018 21:15	319,20	33,00
7/4/2018 2:45	160,80	0,1608	03/04/2018 21:10	428,40	33,00
7/4/2018 2:50	160,80	0,1608	03/04/2018 21:05	442,80	33,00
7/4/2018 2:55	160,80	0,1608	03/04/2018 21:00	442,80	33,00
7/4/2018 3:00	160,80	0,1608	03/04/2018 20:55	447,60	33,00
7/4/2018 3:05	159,60	0,1596	03/04/2018 20:50	423,60	33,00
7/4/2018 3:10	159,60	0,1596	03/04/2018 20:45	394,80	33,00
7/4/2018 3:15	158,40	0,1584	03/04/2018 20:40	315,60	33,00
7/4/2018 3:20	159,60	0,1596	03/04/2018 20:35	313,20	33,00
7/4/2018 3:25	159,60	0,1596	03/04/2018 20:30	309,60	33,00
7/4/2018 3:30	158,40	0,1584	03/04/2018 20:25	312,00	33,00
7/4/2018 3:35	158,40	0,1584	03/04/2018 20:20	324,00	33,00

Codi LabVIEW

